

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Tihomir Betti

TESTIRANJE FOTONAPONSKIH MODULA U  
REALNIM UVJETIMA

MAGISTARSKI RAD

Split, 2005.

Mentor rada: Dr. sc. Ivan Zulim, red. prof.

Radnja ima 103 lista

Rad br.

Komisija za ocjenu rada:

Dr. sc. Dragan Poljak, red. prof.

Dr. sc. Ivan Zulim, red. prof.

Dr. sc. Tomislav Kilić, doc.

Komisija za obranu rada:

Dr. sc. Dragan Poljak, red. prof.

Dr. sc. Ivan Zulim, red. prof.

Dr. sc. Tomislav Kilić, doc.

Dr. sc. Ivica Puljak, doc.

Magistarski rad obranjen je 18. studenog 2005. godine na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu.

*Zahvaljujem svim kolegama i prijateljima na dragocjenim savjetima i pomoći prilikom izrade ovog rada, a posebnu zahvalu upućujem mom dragom mentoru i učitelju dr. sc. Ivanu Zulimu.*

*Veliko hvala mojoj obitelji na ljubavi i podršci koju mi pružaju.*

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. SUNČANA ČELIJA .....	4
2.1. Osnovni parametri sunčane ćelije.....	6
2.2. Serijski i paralelni otpor sunčane ćelije.....	7
2.3. Snaga i djelotvornost sunčane ćelije; faktor punjenja.....	8
2.4. Utjecaj temperature i ozračenja na karakteristike sunčane ćelije.....	9
2.5. Materijali za proizvodnju sunčanih ćelija .....	10
2.6. Sunčane ćelije od amorfno silicija.....	12
2.7. Model sunčane ćelije .....	13
2.7.1. Simulacija $I-U$ karakteristike sunčane ćelije .....	15
2.7.2. Empirijski model .....	16
2.7.3. Swartzov model .....	17
3. SUNČEVO ZRAČENJE .....	23
3.1. Sunčevo zračenje na površini Zemlje.....	27
3.2. Prividno gibanje Sunca.....	28
3.2.1. Lokalno i pravo Sunčevo vrijeme.....	28
3.2.2. Proračun ekstraterestičkog zračenja .....	31
3.2.3. Deklinacija Sunca .....	32
3.2.4. Visina Sunca. Sunčev azimut. ....	34
3.2.5. Vrijeme izlaska i zalaska Sunca. Trajanje sunčanog dana. ....	35
3.2.6. Kut upada Sunca.....	36
3.3. Proračun Sunčeva zračenja.....	36
3.3.1. Proračun dnevne vrijednosti raspršenog zračenja na horizontalnu plohu.....	38
3.3.2. Proračun mjesečnog prosjeka dnevne raspršene ozračenosti ...	38
3.3.3. Proračun dnevnog ozračenja horizontalne plohe.....	39
3.3.4. Proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plohu.....	39
3.3.5. Izotropni modeli zračenja na nagnutu plohu .....	40
4. MJERENJE SUNČEVA ZRAČENJA .....	44
4.1. Mjerenje Sunčeva zračenja na Zemlji .....	44
4.1.1. Mjerenje trajanja sisanja Sunca .....	45
4.1.2. Mjerenje zračenja piranometrom i pirheliometrom.....	46
4.1.3. Mjerenje dugovalnog zračenja Zemlje .....	48
4.2. Mjerenje komponenata Sunčeva zračenja .....	49
4.3. Mjerenje komponenata Sunčeva zračenja multipiranometarskim nizom.....	50
4.4. Sustav za mjerenje Sunčeva zračenja na FESB-u .....	51
4.5. Rezultati mjerenja Sunčeva zračenja na FESB-u.....	55
4.5.1. Vremenski prikaz izmjerenih podataka .....	56
4.5.2. Mjerenje Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu.....	59
4.5.3. Rezultati mjerenja Sunčeva zračenja metodom multipiranometarskog niza .....	66

5. MJERENJE TEMPERATURE FOTONAPONSKOG MODULA.....	70
5.1. Sklop za linearizaciju .....	72
5.2. Opis i rezultati mjerenja .....	74
6. MJERENJE KARAKTERISTIČNIH PARAMETARA FOTONAPONSKOG MODULA .....	77
6.1. Opis testiranja.....	78
6.2. Rezultati mjerenja osnovnih parametara FN modula .....	79
6.2.1. Ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju i temperaturi .....	83
6.2.2. Ovisnost napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi ...	85
6.2.3. Proračun funkcijske ovisnosti struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi .....	87
6.2.4. Snimanje $I-U$ karakteristika fotonaponskog modula.....	90
6.2.5. Usporedba Swartzova i empirijskog modela s izmjerenim $I-U$ karakteristikama .....	92
7. ZAKLJUČAK.....	98
Literatura .....	102
Sažetak.....	104
Summary.....	105
Životopis.....	106

# 1. Uvod

Današnja energetska slika svijeta uvelike je posljedica velikih promjena iz vremena industrijske revolucije. Tada je započeo nagli razvoj, a glavni izvor za podmirenje sve većih energetske zahtjeva bila su fosilna goriva: u početku ugljen, a zatim plin i nafta. Ubrzani napredak vodio je do sve većeg iskorištavanja fosilnih izvora, bez razmatranja njihovih negativnih strana. Tek je energetska kriza 1973. godine ukazala na nedostatke konvencionalnih i pobudila interes za tzv. alternativne izvore energije. U to vrijeme započinju intenzivnija istraživanja drugih izvora energije koji bi riješili problem energetske ovisnosti o fosilnim gorivima, a među njima značajnu pažnju dobija i Sunčeva energija.

Mogućnosti korištenja Sunčeve energije na Zemlji vrlo su raznolike, a jedan od najzanimljivijih načina je izravna pretvorba Sunčeve energije u električnu na temelju fotoelektričnog efekta. Pretvorba se događa pomoću elektroničkog uređaja koji se naziva sunčana ćelija. Iako su prve sunčane ćelije izrađene 50.-ih godina prošlog stoljeća te uskoro doživjele i prve primjene u svemirskim letjelicama, tek se s energetsom krizom 1973. počinje ozbiljnije razmišljati o mogućnosti njihove upotrebe i za zemaljske primjene. Vođene željom za pronalaskom novog izvora koji bi im u budućnosti osigurao energetske neovisnost, vodeće svjetske sile SAD, Japan i države zapadne Europe počele su ulagati značajna sredstva u istraživanje i razvoj tehnologije proizvodnje sunčanih ćelija. Razvojem i modernizacijom tehnologije, istraživanjem novih materijala postignut je veliki napredak u povećanju efikasnosti i smanjenju cijena sunčanih ćelija, a njihova proizvodnja u posljednjih nekoliko godina bilježi godišnji porast od oko 35 % [1].

Da bi se mogla izvršiti usporedba karakteristika sunčanih ćelija proizvedenih na različitim mjestima u svijetu, propisani su standardi u kojima se vrši njihovo ispitivanje. Ti uvjeti podrazumijevaju ozračenost površine modula od  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperaturu od  $25^\circ\text{C}$  te Sunčev spektar zračenja koji odgovara AM 1,5 raspodjeli i nazivaju se standardni uvjeti testiranja (engl. STC – Standard Testing Conditions). Karakteristike fotonaponskog modula (vršna snaga, struja kratkog spoja, napon otvorenog kruga, djelotvornost) koje daju proizvođači odnose se upravo na standardne uvjete testiranja. U realnim primjenama, međutim, karakteristike fotonaponskog modula definirane su uvjetima na mjestu njegove primjene, u prvom redu Sunčevim zračenjem koje upada na površinu modula te temperaturom.

Sunčevo zračenje mijenja se tijekom dana, mjeseca i godine i ovisi o zemljopisnom položaju promatranog mjesta i lokalnim atmosferskim prilikama. Stoga ga je nemoguće egzaktno proračunati pa je jedini pouzdan način određivanja Sunčeva zračenja dugotrajnim mjerenjima. Najraširenija su mjerenja Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu, iz kojih se primjenom određenih modela (Liu-Jordanov, Kleinov i dr.) može proračunati zračenje na plohu proizvoljne orijentacije. Vrlo često je za projektiranje sustava temeljenog na korištenju Sunčeve energije korisno poznavati ne samo iznos ukupnog Sunčeva zračenja, nego i iznos i vremensku ovisnost pojedine njegove komponente. Tako je npr. za koncentrirajuće sustave od velike važnosti poznavanje izravne komponente Sunčeva zračenja koju je moguće izmjeriti pirheliometrom postavljenim na uređaj za praćenje kretanja Sunca po nebu. Glavni nedostatak takvog sustava je njegova skupoća kao i potreba česte provjere ispravnog praćenja Sunčeva gibanja. Zbog toga se ovakva mjerenja vrše na relativno malom broju mjernih postaja. Češće se mjeri raspršeno Sunčevo zračenje pomoću piranometra čiji je osjetni dio tijekom dana zaklonjen od izravnog Sunčeva zračenja prstenom ili kuglicom za zasjenjivanje. Korištenje kuglice za zasjenjivanje daje preciznije rezultate, ali isto zahtijeva primjenu sustava za praćenje kretanja Sunca što značajno povećava cijenu takvog sustava. Ukoliko se primjenjuje prsten za zasjenjivanje potrebno je izvršiti korekciju izmjerenih vrijednosti jer osim što sprječava dopiranje izravne komponente do osjetnog tijela piranometra, prsten zaklanja i dio neba iz kojeg upada raspršeno Sunčevo zračenje. Kako se putanja Sunčevog kretanja po nebu mijenja tijekom godine, potrebno je svakih nekoliko dana izvršiti podešavanje položaja prstena.

Vođeni spomenutim nedostacima mjerenja komponenata Sunčeva zračenja, grupa autora (Faiman i dr.) je predložila upotrebu tzv. metode multipiranometarskog niza. Metoda se temelji na postavljanju nekoliko različito orijentiranih piranometara i primjeni algoritma kojim se iz izmjerenih vrijednosti Sunčeva zračenja proračunaju izravna i raspršena komponenta. Ukoliko se eliminira utjecaj raspršenog zračenja, ukupno zračenje koje mjeri svaki od piranometara može se prikazati kao linearna kombinacija ukupne i raspršene komponente pri čemu je potrebno poznavati parametre koji se mogu odrediti iz solarne i geometrije postavljenog sustava.

S obzirom da se Sunčevo zračenje u R. Hrvatskoj ne mjeri sustavno, a i postojeća mjerenja su relativno novijeg datuma, na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje postavljen je sustav kojim se mjeri ukupno i raspršeno zračenje na horizontalnu plohu, a paralelno s njim multipiranometarski niz. Cilj je uspostava dugotrajnih i pouzdanih mjerenja koja će omogućiti ispitivanje postojećih i razvoj novih



modela te dati potpuniju sliku o mogućnostima korištenja Sunčeve energije u splitskom području.

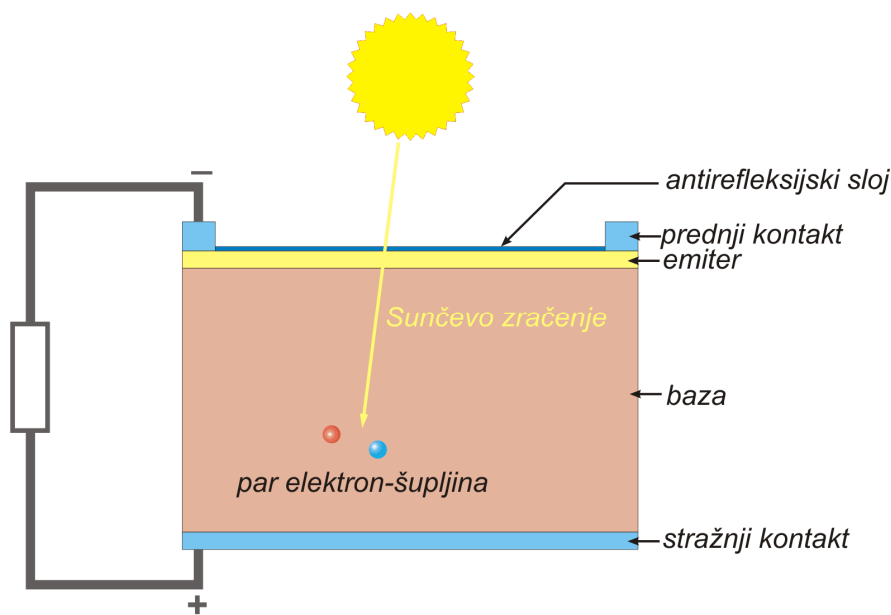
Uz sustav za mjerenje Sunčeva zračenja, postavljen je i sustav za mjerenje temperature te sustav za snimanje strujno-naponske karakteristike fotonaponskog modula. U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja Sunčeva zračenja u razdoblju od svibnja do rujna 2005. godine, kao i rezultati testiranja fotonaponskog modula u realnim uvjetima. Ispitana je ovisnost parametara fotonaponskog modula o zračenju i temperaturi, a snimljene strujno naponske-karakteristike uspoređene su sa simuliranima pomoću empirijskog i Swartzovog modela sunčane ćelije. Za period od tri mjeseca izračunato je ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu metodom multipiranometarskog niza te su vrijednosti uspoređene s mjerenjima konvencionalnim načinom.

Sam rad podijeljen je u dva dijela. U prvom dijelu, koji obuhvaća drugo i treće poglavlje, dane su osnovne definicije vezane uz sunčanu ćeliju i Sunčevo zračenje te su opisani modeli i algoritmi proračuna pojedinih veličina. U drugom poglavlju definirani su osnovni parametri sunčane ćelije: struja kratkog spoja, napon otvorenog kruga, točka maksimalne snage, djelotvornost i faktor punjenja. Opisan je utjecaj serijskog i paralelnog otpora na strujno-naponsku karakteristiku sunčane ćelije, kao i utjecaj zračenja i temperature na promjenu osnovnih parametara. Izvedena je osnovna jednadžba nadomjesnog sklopa sunčane ćelije te su opisana dva modela korištena za simulaciju strujno-naponskih karakteristika: empirijski i Swartzov model. U trećem poglavlju obrađuje se Sunčevo zračenje. Definirane su komponente Sunčeva zračenja i osnovni pojmovi vezani za solarnu geometriju te su opisani najčešće korišteni algoritmi proračuna Sunčeva zračenja.

U drugom dijelu rada dan je opis mjerenja Sunčevog zračenja i temperature te testiranje fotonaponskog modula od amorfno silicija, opisani su korišteni mjerni sustavi te su predočeni i analizirani rezultati mjerenja.

## 2. Sunčana ćelija

Sunčana ćelija je elektronički element koji upadnu Sunčevu energiju pretvara izravno u električnu na principu fotonaponskog efekta. Po svojoj strukturi sunčana je ćelija zapravo pn spoj u kojem se apsorbiraju fotoni iz Sunčevog zračenja, a njihova se energija koristi za stvaranje parova nosilaca naboja elektron-šupljina. Unutrašnje električno polje koje postoji u osiromašenom području razdvaja parove nosilaca koji su stvoreni unutar ili u blizini pn spoja; elektroni se gibaju prema n, a šupljine prema p-strani. S prednje i stražnje strane sunčane ćelije postavljaju se kontakti koji prikupljaju razdvojene naboje te se na krajevima ćelije pojavljuje elektromotorna sila. Osnovna struktura sunčane ćelije prikazana je na slici 2.1.



Slika 2.1. Općenita struktura sunčane ćelije

Kad sunčana ćelija nije osvijetljena, kroz nju protječe struja  $I$  definirana Shockleyjevom jednačinom:

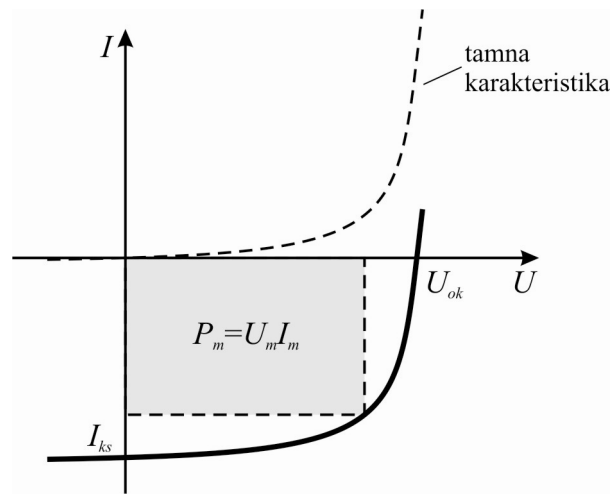
$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right), \quad (2.1)$$

gdje je  $U$  napon na sunčanoj ćeliji,  $m$  faktor idealnosti diode,  $q$  naboj elektrona,  $k$  Boltzmannova konstanta, a  $T$  temperatura. Kad se sunčana ćelija osvijetli, stvaraju se

parovi nosilaca koje razdvaja električno polje u osiromašenom području. Posljedica toga je nastajanje fotostruje  $I_S$  pa se osvijetljena sunčana ćelija ponaša kao strujni izvor. Ako je u izlaznom krugu spojen potrošač otpora  $R$ , u slučaju osvijetljene sunčane ćelije struja kroz taj potrošač bit će:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - I_S. \quad (2.2)$$

Zbog stvaranja fotostruje karakteristika se pomiče iz 1. u 4. kvadrant gdje je sunčana ćelija izvor struje, slika 2.2.



Slika 2.2.  $I$ - $U$  karakteristika neosvijetljene i osvijetljene sunčane ćelije [2]

Sama karakteristika sunčane ćelije proteže se i u 1. i 3. kvadrant, ali se obično crta samo dio u 4. kvadrantu jer je to radno područje sunčane ćelije u kojem ona daje električnu energiju. Dogovorno se vrijednost struje uzima pozitivno pa je zapravo uobičajeno karakteristiku sunčane ćelije prikazati u 1. kvadrantu. U tom slučaju jednačba (2.2) postaje:

$$I = I_S - I_0 \left( e^{\frac{qU}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

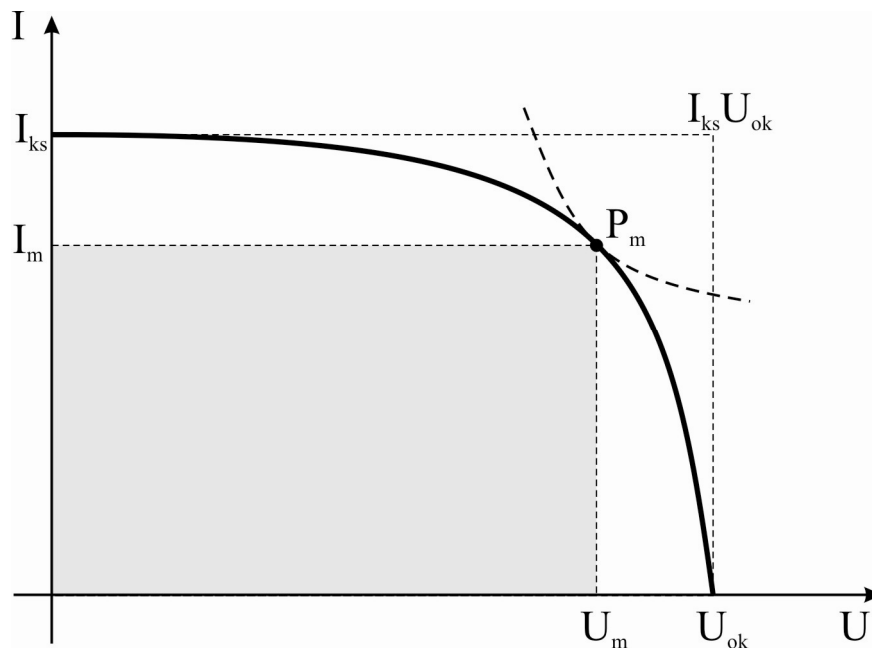
Strujno-naponska karakteristika kraće se naziva  $I$ - $U$  karakteristika i najpotpunije opisuje sunčanu ćeliju. Iako je uvriježen naziv  $I$ - $U$ , na osi apscisa prikazuje se vrijednost napona, a na ordinati vrijednost struje. Na  $I$ - $U$  karakteristici definiraju se osnovni parametri sunčane ćelije.

## 2.1. Osnovni parametri sunčane ćelije

$I$ - $U$  karakteristika sunčane ćelije prolazi kroz tri karakteristične točke u kojima su definirani najvažniji parametri sunčane ćelije:

1. Struja kratkog spoja  $I_{ks}$  – struja koja teče kad je napon na stezaljkama sunčane ćelije jednak nuli.
2. Napon otvorenog kruga  $U_{ok}$  – napon koji postoji na stezaljkama sunčane ćelije u režimu otvorenog kruga (tj., kad je  $I=0$ ).
3. Točka maksimalne snage  $P_m$  – točka u kojoj sunčana ćelija daje najveću moguću snagu. Maksimalna snaga  $P_m$  odgovara najvećoj mogućoj površini pravokutnika koji se može upisati u  $I$ - $U$  karakteristiku. U točki maksimalne snage vrijednost struje je  $I_m$ , a napona  $U_m$ .

Osnovni parametri sunčane ćelije prikazani su na slici 2.3.



Slika 2.3. Osnovni parametri sunčane ćelije

Struja kratkog spoja može se izračunati uvrštavanjem uvjeta  $U=0$  u jednadžbu (2.3) pa se dobija:

$$I_{ks} = I_S \cdot \quad (2.4)$$

Na isti se način može pronaći napon otvorenog kruga, uvrštavanjem uvjeta  $I=0$  te je:

$$U_{ok} = \frac{m \cdot k \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{I_S}{I_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Dakle, napon otvorenog kruga ovisi o iznosu fotostruje  $I_S$  i o struji zasićenja diode  $I_0$  za koju je poželjno da je što manjeg iznosa.

Omjer napona otvorenog kruga i struje kratkog spoja naziva se karakteristični otpor i označava s  $R_k$ :

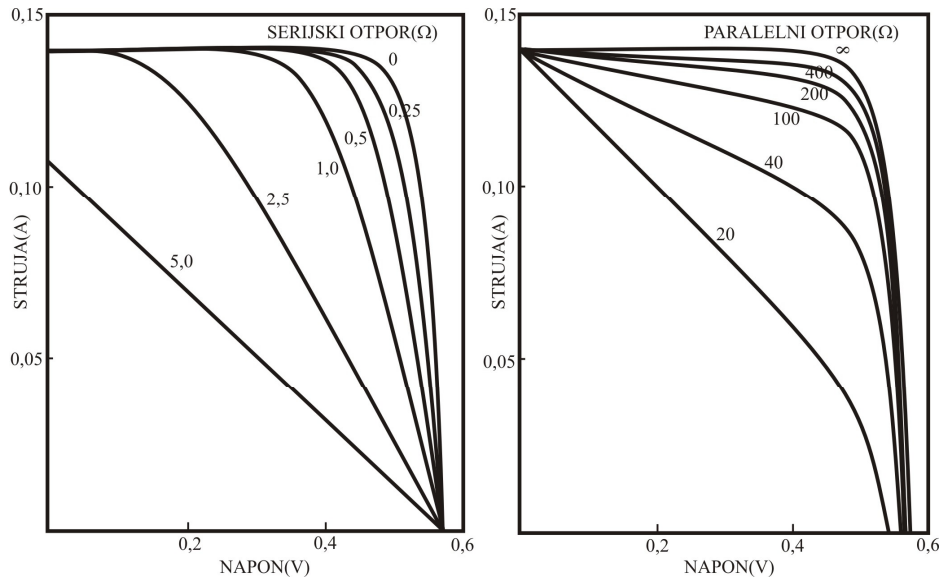
$$R_k = \frac{U_{ok}}{I_{ks}}. \quad (2.6)$$

## 2.2. Serijski i paralelni otpor sunčane ćelije

Serijski otpor sunčane ćelije  $R_S$  je omski otpor na koji nailazi struja koja teče kroz ćeliju i kroz površinu ćelije prema kontaktima do spoja s priključkom na vanjski krug. Na iznos serijskog otpora utječe otpor materijala, kontakata i dr. Najvažniji efekt koji je posljedica postojanja serijskog otpora je smanjenje faktora punjenja, a pri većim vrijednostima može doći i do smanjenja struje kratkog spoja [3]. Iznos serijskog otpora nije stalan; mijenja se kako se mijenja i cijela strujno-naponska karakteristika sunčane ćelije s promjenom temperature i razine ozračenja. Kvalitetne sunčane ćelije imaju manji serijski otpor, odnosno oštrije koljeno  $I-U$  karakteristike.

Paralelni otpor  $R_P$  posljedica je postojanja lokalnih defekata u pn spoju zbog čega dolazi do gubitaka zbog otjecajnih struja. U idealnoj sunčanoj ćeliji otpor  $R_P$  je beskonačan, ali u realnim su slučajevima struje otjecanja proporcionalne naponu na ćeliji. Mala vrijednost paralelnog otpora omogućuje otjecanje dijela fotostruje, što je posebno značajno pri manjim vrijednostima ozračenja. Gubitke zbog paralelnog otpora karakterizira nelinearnost i nestalnost pa se razlikuju od ćelije do ćelije.

Utjecaj serijskog i paralelnog otpora na  $I-U$  karakteristiku prikazan je slikom 2.4.



Slika 2.4. Utjecaj a) serijskog b) paralelnog otpora na  $I-U$  karakteristiku

Serijski i paralelni otpor utječu na oblik  $I-U$  karakteristike sunčane ćelije te na ukupnu snagu. Taj se utjecaj može zanemariti u slučaju kad je serijski otpor puno manji od karakterističnog otpora ( $R_S \ll R_k$ ), odnosno ako je paralelni otpor puno veći od karakterističnog otpora ( $R_P \gg R_k$ ). Ukoliko se u modelu sunčane ćelije uključi utjecaj otpora  $R_S$  i  $R_P$ , jednadžba (2.3) postaje:

$$I = I_S - I_0 \left( e^{\frac{q \cdot U}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_P}. \quad (2.7)$$

### 2.3. Snaga i djelotvornost sunčane ćelije; faktor punjenja

Snaga koju daje sunčana ćelija jednaka je:

$$P = U \cdot I = U \cdot \left[ I_S - I_0 \left( e^{\frac{q \cdot U}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_P} \right]. \quad (2.8)$$

Maksimalna snaga  $P_m$  može se prikazati preko  $I_{ks}$  i  $U_{ok}$ :

$$P_m = U_m \cdot I_m = U_{ok} \cdot I_{ks} \cdot FF, \quad (2.9)$$

gdje je  $FF$  faktor punjenja (engl. Fill Factor). Faktor punjenja je omjer površine pravokutnika čije su stranice  $U_m$  i  $I_m$  (najveći pravokutnik koji se može upisati u  $I-U$  karakteristiku) i pravokutnika sa stranicama  $U_{ok}$  i  $I_{ks}$ . Vrijednost faktora punjenja govori o tome koliko se stvarna ćelija približava idealnoj, odnosno koliki je utjecaj serijskog otpora

ćelije. U praksi je vrijednost faktora punjenja obično između 0,7 i 0,9 i opada linearno s omjerom  $R_S/R_k$  i  $R_k/R_P$  [2].

Djelotvornost sunčane ćelije  $\eta$  definira se kao omjer između maksimalne snage koju ćelija može dati  $P_m$  i snage Sunčeva zračenja koje upada na ćeliju  $P_u$ :

$$\eta = \frac{P_m}{P_u} = \frac{P_m}{E \cdot A} = \frac{U_m \cdot I_m}{E \cdot A}, \quad (2.10)$$

gdje je  $E$  ozračenje površine, a  $A$  površina sunčane ćelije. Uvrštavajući izraz za maksimalnu snagu iz (2.9):

$$\eta = FF \cdot \frac{U_{ok} \cdot I_{ks}}{E \cdot A}. \quad (2.11)$$

Djelotvornost sunčane ćelije je to veća što je faktor punjenja bliži jedinici i što je veći iznos struje kratkog spoja. Najveća djelotvornost sunčane ćelije pri određenom ozračenju i temperaturi postiže se ukoliko je na sunčanu ćeliju spojen optimalni iznos potrošača.

## 2.4. Utjecaj temperature i ozračenja na karakteristike sunčane ćelije

Karakteristike sunčane ćelije mijenjaju se promjenom temperature i ozračenja. Promjena temperature uglavnom utječe na iznos napona otvorenog kruga, dok je promjena fotostruje gotovo zanemariva. Reverzna struja zasićenja  $I_0$  ovisi o temperaturi i može se zapisati kao:

$$I_0 = A \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}, \quad (2.12)$$

gdje je  $A$  konstanta za određenu sunčanu ćeliju, a  $E_g$  širina zabranjenog pojasa. Ako se u jednadžbu (2.3) uvrsti uvjet za otvoreni krug:  $I=0$ ,  $U=U_{ok}$ , tada je uz (2.12) moguće pisati:

$$I_{ks} = A \cdot T^3 \cdot e^{\frac{qU_{ok} - E_g}{kT}}. \quad (2.13)$$

Relacija (2.13) dobivena je zanemarivanjem jedinice u odnosu na eksponencijalni član u izrazu (2.3) i uz pretpostavku da je  $m=1$ . Ako se (2.13) derivira po temperaturi i zanemari promjena struje kratkog spoja ( $dI_{ks}/dT \approx 0$ ), dobije se izraz za promjenu napona otvorenog kruga:

$$\frac{dU_{ok}}{dT} = \frac{qU_{ok} - E_g}{qT} - 3\frac{k}{q}. \quad (2.14)$$

Uvrštavanjem tipičnih vrijednosti za širinu zabranjenog pojasa poluvodičkog materijala koji se koristi za izradu sunčanih ćelija kao i vrijednosti napona otvorenog kruga na sobnoj temperaturi u izraz (2.14), uočava se da napon otvorenog kruga opada s porastom temperature [2], Tablica 2.1.

Tablica 2.1. Promjena napona otvorenog kruga u ovisnosti o temperaturi za Si i GaAs

	$E_g$ [eV ]	$U_{ok}$ [V], T=273 K	$dU_{ok}/dT$ [mV/K]
Si	1,12	0,65	-1,98
Si	1,12	0,55	-2,35
GaAs	1,4	1,05	-1,54
GaAs	1,4	0,85	-2,27

Opadanje vrijednosti napona otvorenog kruga više je izraženo od porasta struje kratkog spoja, što rezultira i ukupnim opadanjem snage te djelotvornosti sunčane ćelije.

U praksi je porast temperature sunčane ćelije uvijek povezan s povećanjem intenziteta upadnog Sunčeva zračenja. Intenzitet upadnog zračenja ovisi o čitavom nizu parametara kao što su kut upada  $\theta$ , doba dana i godine, utjecaj atmosferskih prilika, zasjenjivanje ćelije od strane okolnih objekata i sl. Iznos upadnog zračenja određuje iznos struje kratkog spoja jer je veće zračenje stvara više parova nosilaca. Ovisnost napona otvorenog kruga o zračenju je logaritamska pa će njegova promjena biti puno manje izražena.

## 2.5. Materijali za proizvodnju sunčanih ćelija

Prema tehnologiji izrade fotonaponski moduli mogu se podijeliti u dvije glavne kategorije:

- Moduli temeljeni na pločicama kristaliničnog silicija
- Moduli izrađeni u tankoslojnoj tehnologiji, kao što su tankoslojni silicij, bakar/indij/galij-selenid/sulfid (CIGS), amorfni silicij (a-Si) i kadmij-telurid (CdTe).

Prva komercijalna sunčana ćelija izrađena je od kristaliničnog silicija 50-ih godina prošlog stoljeća, a 1958. godine su slične sunčane ćelije primijenjene za napajanje satelita električnom energijom. Do danas je tehnologija proizvodnje fotonaponskih modula temeljena na pločicama od kristaliničnog silicija ostala dominantna iz više razloga:



tehnologija je dosta raširena, dokazana je njena pouzdanost, poznata je, a znanje i tehnologija potječu od elektroničke industrije. Kristalinični silicij se uglavnom proizvodi postupkom Czochralskog kojim se u rastaljeni silicij visoke čistoće ubacuje kristalna jezgra. Rotiranjem jezgre i polaganim izvlačenjem, na jezgri se kristalizira silicij te se tako proizvode šipke koje se kasnije režu u tanke pločice. Pločice se zatim dodatno obrađuju i od njih se izrađuju sunčane ćelije, postavljaju se kontakti i izrađuje fotonaponski modul. Cijena kristaliničnog silicija je prilično visoka jer su tehnološki postupci dobivanja silicija zahtijevane vrlo visoke čistoće jako skupi. Drugi veliki nedostatak ove tehnologije su veliki gubici materijala prilikom obrade. Tako je moguće da se tijekom rezanja šipke u tanke pločice izgubi 50% i više materijala. Konačno, proizvodnja kristaliničnog silicija je postupak koji zahtijeva jako puno energije pa je u konačnici vrijeme isplate modula od kristaliničnog silicija značajnije duže u usporedbi s vremenom isplate modula od amorfno silicija.

Fotonaponski moduli se u tankoslojnoj tehnologiji izrađuju prekrivanjem čitave površine podloge (najčešće se kao podloga koriste staklo ili nehrđajući čelik) mikrometarski tankim slojevima vodljivog i poluvodičkog materijala. Ovakvim se načinom izrade mogu postići značajne uštede u materijalu i u utrošku energije. Trenutno je djelotvornost ovako proizvedenih fotonaponskih modula između 5 i 15%, ali se s postojećim tehnologijama ona može popraviti na 15-20% [1]. Prema predviđanjima, do 2030. godine će djelotvornost komercijalno dostupnih fotonaponskih modula biti 10-30%.

Kristalinični silicij je i danas uvjerljivo najzastupljenija tehnologija izrade fotonaponskih modula, s tržišnim udjelom od oko 95%. Tankoslojne tehnologije su posljednjih 10-ak godina pale s 15% tržišnog udjela koliko su imale 1995. do današnjih oko 5%. Međutim, predviđa se da će nakon 2010. godine udio tankoslojnih tehnologija ponovo početi rasti. Proizvođači silicija danas sve teže prate zahtjeve za materijalom koje im nameću proizvođači fotonaponskih modula od kristaliničnog silicija. Ukoliko se postojeći trendovi rasta nastave, moguće je da zbog nedostatka materijala pad cijene fotonaponskih modula bude značajno usporen. To je činjenica koja dodatno ide u prilog tankoslojnim tehnologijama od kojih se očekuje da u narednim godinama značajnije uđu na tržište.

## 2.6. Sunčane ćelije od amorfnog silicija

Jedna od tankoslojnih tehnologija koje se sve intenzivnije istražuju je tehnologija proizvodnje sunčanih ćelija od amorfnog silicija. Proizvodnja je relativno jednostavna i jeftina i zasniva se na nanošenju tankog sloja silicija u amorfnom stanju na podlogu. Na taj se način potrošnja materijala drastično smanjuje u odnosu na kristalinični silicij.

Posebnosti amorfnog silicija posljedica su njegove kristalne strukture. Za razliku od kristaliničnog silicija u kojem postoji pravilna kristalna struktura koja se ponavlja, te polikristaliničnog silicija u kojem pravilna kristalna struktura postoji u manjem dosegu kod amorfnog silicija ne postoji ni uređenost dugog ni kratkog dosega. Kao i kod kristaliničnog silicija, atomi silicija su međusobno povezani kovalentnim vezama, ali se u materijalu nalazi veliki broj slobodnih, tzv. "njihajućih veza" (engl. Dangling bond). Posljedica takve strukture je veliki broj lokaliziranih energijskih stanja u zabranjenom pojasu te se on ne može jednoznačno odrediti. Ipak, širina zabranjenog pojasa može se odrediti mjerenjem ovisnosti apsorpcijskog faktora o valnoj dužini upadnog zračenja. Širina zabranjenog pojasa ovisi o načinu proizvodnje amorfnog silicija, a tipične su mu vrijednosti između 1,65 i 1,8 eV [2]. Jedna je od važnijih karakteristika amorfnog silicija veliki apsorpcijski faktor, koji je u području valnih dužina od 550 nm (gdje je maksimum Sunčeva zračenja) za red veličine veći od apsorpcijskog faktora kristaliničnog silicija. Stoga je za fotonaponsku pretvorbu sloj amorfnog silicija svega oko 1  $\mu\text{m}$ , dok je za monokristalinični potrebna debljina oko 200  $\mu\text{m}$ .

Električne karakteristike amorfnog silicija značajno se popravljaju dodavanjem vodika. Vodik se veže na viseće veze te na taj način smanjuje broj lokalizirani stanja u zabranjenom pojasu, odnosno uzrokuje povećanje širine zabranjenog pojasa, ali i smanjuje apsorpciju. Amorfnu silicij s dodanim vodikom označava se a-Si:H.

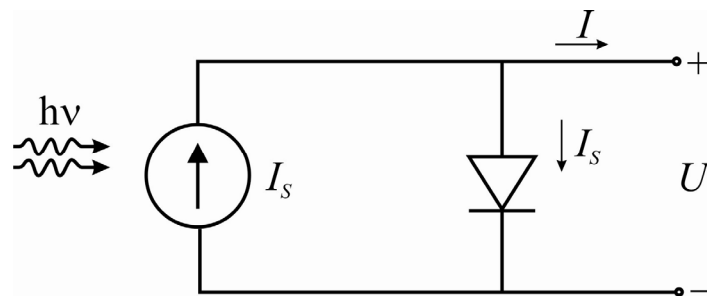
Najčešće se za izradu poluvodičke strukture kao nečistoće koriste fosfor i bor. Dodavanje tih nečistoća amorfnom siliciju je prilično neučinkovito jer mali broj nečistoća "daje" slobodni elektron. To je opet posljedica visećih veza i njihovog utjecaja na donorske primjese. Osim bora i fosfora, amorfnom se siliciju mogu dodavati i drugi elementi (najčešće su to C, Ge, O i N) kojima se značajno mijenjaju karakteristike dobivenog materijala, u prvom redu promjenom širine zabranjenog pojasa.

Karakteristična pojava koja se javlja kod sunčanih ćelija od amorfnog silicija je značajno smanjenje djelotvornosti u prvih nekoliko dani izloženosti svjetlu. Tijekom prvih

nekoliko mjeseci djelotvornost opadne za 10 do 15%, ali nakon toga se ćelija stabilizira. Ta je pojava poznata pod nazivom Staebler-Wronski efekt. Uočeno je da se zagrijavanjem u mraku na temperaturi iznad 150°C poništava Staebler-Wronski efekt i ćelija se vraća u svoje prvobitno stanje. Iako još nema pravog objašnjenja pojave degradacije sunčane ćelije pri izloženosti svjetlu, pretpostavlja se da razlog leži u samoj amorfnoj strukturi, odnosno slabim vezama među silicijevim atomima koje se prekidaju i tako nastaju viseće veze. Isto tako, pretpostavlja se da vodik ima vrlo važnu ulogu u stvaranju i nestajanju visećih veza.

## 2.7. Model sunčane ćelije

Sunčana ćelija je po svojoj strukturi pn spoj koji ima sposobnost generiranja paraova elektron-šupljina apsorpcijom fotona iz upadnog svjetla. Stoga se u idealnom slučaju sunčana ćelija može nadomjestiti sklopom koji se sastoji od strujnog izvora i njemu paralelno spojene poluvodičke diode, slika 2.5.

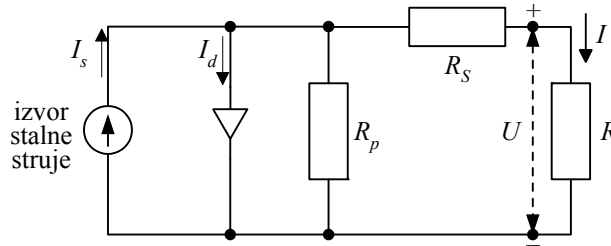


Slika 2.5. Idealni nadomjesni sklop sunčane ćelije

Sklop na slici 2.5. može se opisati jednadžbom:

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \cdot \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right). \quad (2.15)$$

Realni nadomjesni sklop sunčane ćelije uključuje i utjecaj serijskog i paralelnog otpora, slika 2.6.



Slika 2.6. Realni nadomjesni sklop sunčane ćelije

U realnom nadomjesnom sklopu sunčane ćelije koji je prikazan na slici 2.6., izlazna struja  $I$  opisana je jednadžbom:

$$I = I_s - I_0 \left( e^{\frac{q \cdot U + I \cdot R_s}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{U}{R_p}. \quad (2.16)$$

U analizi rada sunčane ćelije primjenjuju se modeli koji mogu biti i složeni ako uključuju razne stupnjeve nelinearnosti zbog nejednolike raspodjele gustoće struje i gradijenta potencijala na površini poluvodiča. Budući da složeni modeli zahtijevaju i složeniji postupak računanja, često se radi s jednostavnijima, odnosno prikladnijima, pogotovo ako se analiza provodi primjenom elektroničkog računala.

Kriterij za odabir modela sunčane ćelije jest prije svega mogućnost simulacije njene stvarne strujno-naponske karakteristike, zatim mogućnost pouzdane procjene karakterističnih veličina u određenom temperaturnom području i rasponu razine ozračenja.

Idealni model osvijetljenog pn spoja ne opisuje s dostatnom točnošću stvarnu  $I$ - $U$  karakteristiku sunčane ćelije jer ne sadrži ključne parametre kao što su linearni otpor metalnih priključaka, strujni gubici i slojni otpor poluvodiča. Slojni otpor (engl. sheet resistance) je parametar koji ovisi o koncentraciji primjesa, a određen je prosječnim iznosom električne provodnosti poluvodičkog sloja.

Nadomjesni sklop sunčane ćelije u koji su upravo uključeni i navedeni parametri prikazan je na slici 2.6., a odgovarajući analitički izraz (2.16) koristi se kao polazište za nekoliko tipova modela prikladnih za analizu primjenom računala.

Modeli se međusobno razlikuju po načinu određivanja parametara ( $R_s$ ,  $R_p$ ,  $m$ ) veličinama koje se mogu izmjeriti na samoj ćeliji ili očitati iz priloženih (izmjerenih)  $I$ - $U$  karakteristika:  $I_{ks}$ ,  $U_{ok}$ ,  $U_m$ ,  $I_m$ , slika 2.4.

### 2.7.1. Simulacija $I$ - $U$ karakteristike sunčane ćelije

Za opis izlazne karakteristike fotonaponskoga modula može se upotrijebiti model njegovog osnovnog elementa tj. jedne sunčane ćelije ako se pretpostavi električka identičnost, tj. podudarnost strujno-naponskih karakteristika svih sunčanih ćelija od kojih je modul sastavljen.

Karakteristika modula je općenito funkcija temperature i ozračenja,  $I=I(U,E,T)$ . Promjena temperature očituje se na  $I$ - $U$  karakteristici kao pomak po strujnoj i naponskoj osi i promjeni zakrivljenosti koljena krivulje. S porastom temperature raste i struja kratkog spoja, ali ta je promjena praktički neznatna u usporedbi s promjenom ostalih parametara. Porast struje kratkog spoja povezuje se s linearnim smanjenjem širine zabranjenog pojasa s porastom temperature pa je potrebna manja energija fotona za stvaranje parova elektron-šupljina.

Kako je napon otvorenog kruga funkcija reverzne struje zasićenja  $I_0$  (struja manjinskih nosilaca neosvijetljenog pn spoja), time je izražena i njegoova temperaturna ovisnost jer je  $I_0$  funkcija kvadrata intrinzične koncentracije koja jako brzo raste s temperaturom.

U stručnoj literaturi može se pronaći više različitih modela sunčanih ćelija pogodnih za analizu primjenom računala. Međusobno se razlikuju u načinu uključivanja odgovarajućih parametara kojima je pobliže definiran rad odgovarajuće pn strukture sunčane ćelije, ali im je zajednička osnovna karakteristika da se oslanjaju na parametre sunčane ćelije koje je moguće izmjeriti.

U ovom radu bit će opisana dva modela: empirijski model [4] koji kao ulazne parametre koristi samo struju kratkog spoja, napon otvorenog kruga i točku maksimalne snage, te Swartzov model [5] koji je puno složeniji i izrađen je za sunčane ćelije od amorfnog silicija.

## 2.7.2. Empirijski model

Ovaj model temeljen je također na jednadžbi (2.16) koja se zapisuje kao:

$$I = I_{ks} \cdot \left[ 1 - C_1 \cdot \left( e^{\frac{U}{C_2 \cdot U_{ok}}} - 1 \right) \right], \quad (2.17)$$

gdje su parametri  $C_1$  i  $C_2$  dani s:

$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{ks}} \right) \cdot e^{-\frac{U_m}{C_2 \cdot U_{ok}}}, \quad (2.18)$$

$$C_2 = \left( \frac{U_m}{U_{ok}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{ks}} \right)}. \quad (2.19)$$

Uočeno je da jednadžba (2.17) daje velike greške pri većim iznosima zračenja pa je mjerenjima ustanovljeno da u tim uvjetima bolje slaganje između proračunate i stvarne karakteristike daje jednadžba:

$$I = K_6 - e^{K_4 \cdot U^n - K_5} \quad (2.20)$$

Ukoliko se konstante izraze preko karakterističnih parametara sunčane ćelije  $I_{ks}$ ,  $U_{ok}$ ,  $I_m$  i  $U_m$ :

$$I = I_{ks} \cdot \left[ 1 - C_3 \cdot \left( e^{C_4 \cdot U^n} - 1 \right) \right], \quad (2.21)$$

gdje su konstante  $n$ ,  $C_3$  i  $C_4$  dane s:

$$n = \frac{\ln \left( \frac{C_5}{C_6} \right)}{\ln \left( \frac{U_m}{U_{ok}} \right)}, \quad (2.22)$$

$$C_4 = \frac{C_6}{U_{ok}^n}, \quad (2.23)$$

$$C_5 = \ln \left[ \frac{I_{ks} \cdot (1 + C_3) - I_m}{C_3 \cdot I_{ks}} \right], \quad (2.24)$$

$$C_6 = \ln \left( \frac{1 + C_3}{C_3} \right). \quad (2.25)$$

Konstantu  $C_3$  nije bilo moguće izraziti preko karakterističnih parametara sunčane ćelije već je njen iznos utvrđen metodom pokušaja i pogreške. Pronađeno je da vrijednost

$C_3=0,01175$  osigurava najmanju pogrešku za područje ispitivanih temperatura i ozračenja.

Uzimajući u obzir spomenutu vrijednost za  $C_3$ , ostale su konstante:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{C_5}{4,46}\right)}{\ln\left(\frac{U_m}{U_{ok}}\right)}, \quad (2.26)$$

$$C_4 = \frac{4,46}{U_{ok}^n}, \quad (2.27)$$

$$C_5 = \ln\left[\frac{1,01175 \cdot I_{ks} - I_m}{1,01175 \cdot I_{ks}}\right] \quad (2.28)$$

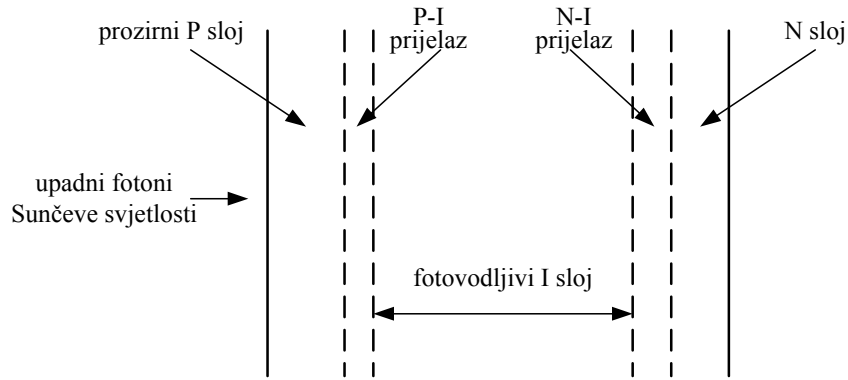
$$C_6 = 4,46 \quad (2.29)$$

Poznavajući vrijednosti karakterističnih parametara sunčane ćelije pri određenoj temperaturi i ozračenju može se izračunati cijela  $I-U$  krivulja. Za izračunavanje  $I-U$  krivulje pri nekoj drugoj temperaturi i ozračenju potrebno je poznavati ovisnost navedenih parametara o temperaturi i ozračenju tj. njihove funkcije,  $f = f(T, E)$ .

### 2.7.3. Swartzov model

Swartzov model predviđen je za sunčane ćelije od amorfnog silicija. Za takve poluvodičke pn spojeve karakteristično je relativno široko intrinzično područje (i-sloj) između p i n sloja [5]. Osnovna p-i-n struktura prikazana je na slici 2.7., a njene temeljne karakteristike su:

- debljina intrinzičnog (i) sloja znatno je veća nego p i n slojeva,
- fotovodljivi (intrinzični) i sloj ima izvjesni električni otpor,
- fotostruja  $I_S$  je konstantna za sve napone  $U < U_{ok}$ ,
- vodljivost i sloja je upravo proporcionalna broju nosilaca naboja,
- svjetlo upada u ćeliju preko p sloja,
- ukupna struja sunčane ćelije je  $I = I_S - I_D$ , gdje je  $I_D$  difuzijska struja kroz p-i i n-i prijelaz, a  $I_S$  fotostruja.



Slika 2.7. PIN struktura opisana Swartzovim modelom

Ovisnost difuzijske struje o naponu  $U$  dana je izrazom:

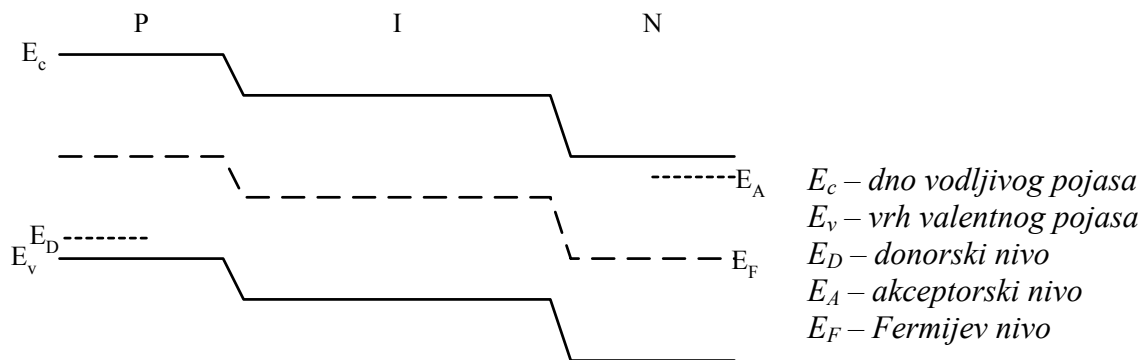
$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\frac{U + (R_s + R_c)I}{m \cdot U_T}} - 1 \right), \quad (2.30)$$

gdje je  $R_s$  fotootpor i-sloja, a  $R_c$  omski strujno neovisni otpor serijski spojen s ćelijom (npr. kontakti otpor),  $m$  faktor idealnosti diode, a  $U_T$  naponski temperaturni ekvivalent.

Zanemari li se jedinica u izrazu (2.30):

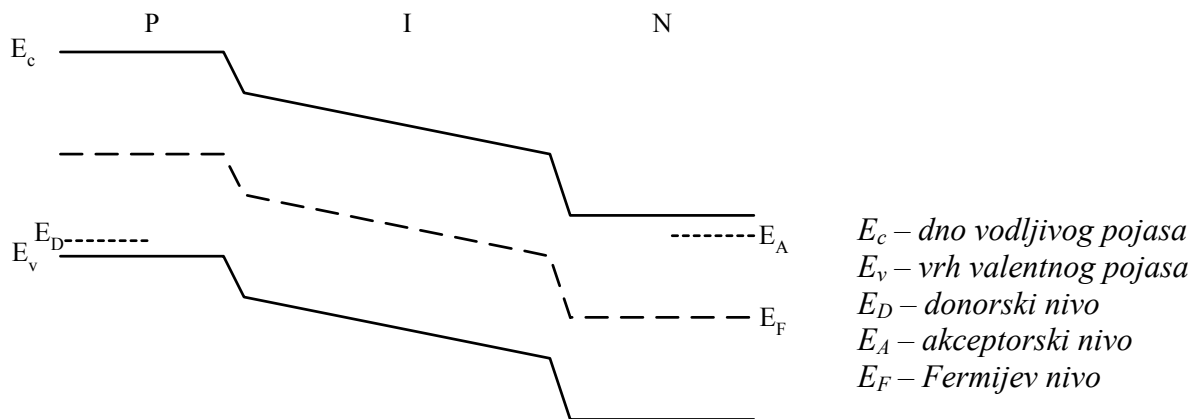
$$U = -(R_s + R_c) \cdot I + m \cdot U_T \cdot \ln \left( \frac{I_D}{I_0} \right) \quad (2.31)$$

Pojednostavljeni dijagrami energijskih razina uz uvjet otvorenog kruga  $I=0$  te uz uvjet kratkog spoja  $U=0$  prikazani su na slikama 2.8 i 2.9.



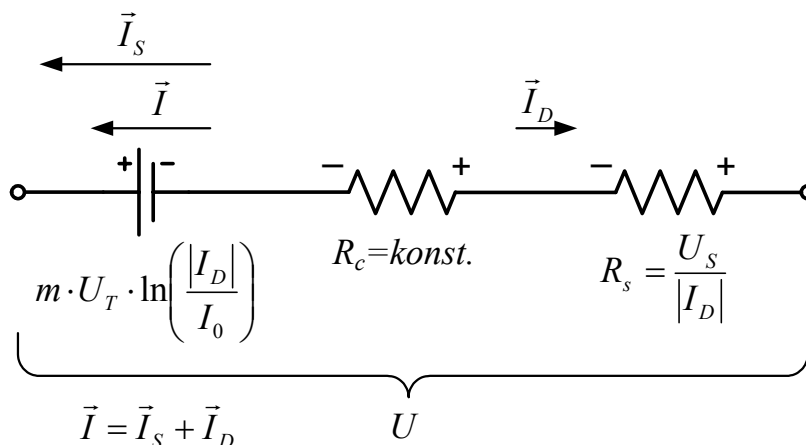
Slika 2.8. Energijski dijagram osvjetljene PIN strukture uz uvjet otvorenog kruga





Slika 2.9. Energetski dijagram osvijetljene PIN strukture uz uvjet kratkog spoja

Električna nadomjesna shema za Swartzov matematički model (2.31) prikazana je na slici 2.10.



Slika 2.10. Nadomjesna shema Swartzovog modela

Vrijednost parametra  $R_s$  može se prikazati kao

$$R_s = \frac{U_s}{|I_D|} = \frac{U_s}{|I_s - I|}. \quad (2.32)$$

Pri naponu  $U=U_{ok}$  struja je  $I=0$  pa vrijedi izraz:

$$R_s = \frac{U_s}{I_s}. \quad (2.33)$$

Ako je ukupna struja približno jednaka fotostruji, tada su gotovo svi nosioci naboja izvučeni iz i-sloja, a to znači da vrijednost serijskog otpora teži neograničeno velikoj vrijednosti.

Kombinirajući jednačbe (2.32) i (2.33) dobiva se:

$$U \approx -R_c \cdot I - \frac{U_s}{\frac{I_s}{I} - 1} + U_T \cdot \ln\left(\frac{I_s - I}{I_0}\right), \quad (2.34)$$

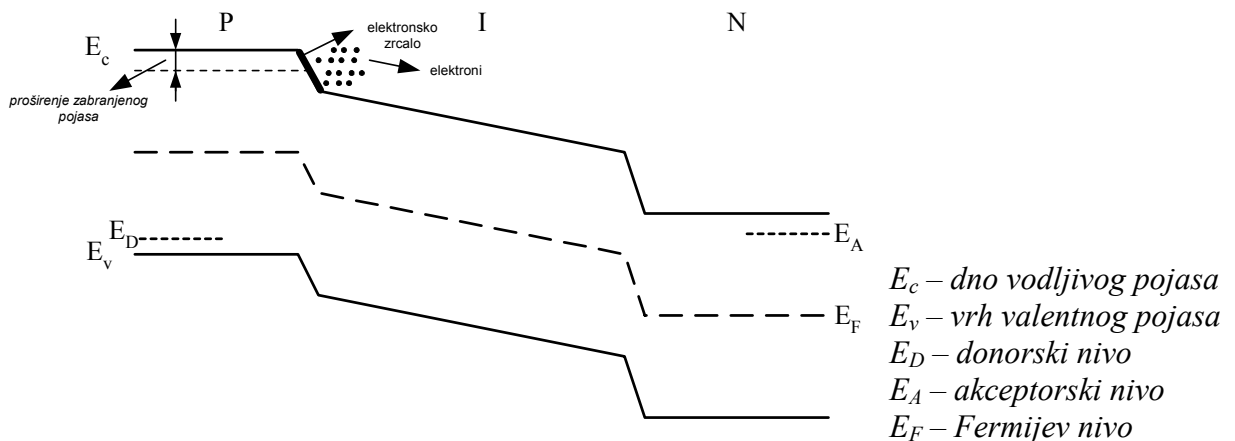
ili

$$U = -R_c \cdot I - \frac{U_s}{\frac{I_s}{I} - 1} + m \cdot U_T \cdot \ln\left(1 - \frac{I}{I_s}\right) + U_{ok}, \quad (2.35)$$

gdje je

$$U_{ok} = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I_s}{I_0}\right). \quad (2.36)$$

Matematički model (2.35) izveden je za slučaj kada je širina zabranjenog pojasa p sloja jednaka širini zabranjenog pojasa i- i n slojeva. U praksi taj uvjet redovito nije ispunjen jer se radi povećanja prozirnosti u p sloj dodaje ugljik što povećava širinu njegovog zabranjenog pojasa. Osim toga, u tako formiranom heterospoju (a-Si:C:H/a-Si:H) onemogućena je difuzija vodljivih elektrona nastalih u neposrednoj blizini prijelaza prema p sloju (efekt elektronskog zrcala). Mjerenja su pokazala dvostruko veću djelotvornost pretvorbe sunčane energije u električnu u području valnih dužina od 0,4 do 0,5  $\mu\text{m}$  za ćelije s p slojem kao elektronskim zrcalom prikazanog na slici 2.11 [6].



Slika 2.11. P sloj kao elektronsko zrcalo

Može se pretpostaviti da se elektroni u cijelosti reflektiraju natrag u i sloj kad je polje u njemu najjače, tj.  $I=I_{ks}$ ;  $I_D \rightarrow 0$ . Refleksije elektrona nema kad je polje koje ih odvodi vrlo malog iznosa tj.  $I=0$ ;  $I_D=I_L$ . Pod pretpostavkom da elektroni čine većinu struje i

da je  $l_d \geq l$ , gdje je  $l_d$  difuzijska dužina elektrona,  $l$  debljina i sloja, otpor i-sloja može se odrediti na temelju same definicije slojnog otpora ili otpora sloja

$$R_s = \int_0^l \frac{dx}{\sigma}, \quad (2.37)$$

gdje je

$$\sigma = n \cdot q \cdot \mu_n. \quad (2.38)$$

U izrazu (2.38) je  $n$  gustoća elektrona,  $\mu_n$  je pokretljivost elektrona,  $\sigma$  električna provodnost (specifična vodljivost). Za područje Sunčeva spektra većina nosilaca koja ulazi u p sloj proizvedena je u području debljine 0,1 $\mu$ m uz p-i sloj, s tim da polovica nosilaca difuzijom odlazi prema n kontaktu, a polovica prema p kontaktu. Bez refleksije elektrona na p sloju vrijedi izraz

$$n \cdot q = \frac{I_D \cdot \tau_n}{l}, \quad (2.39)$$

a u uvjetima refleksije elektrona na p-i sloju

$$n \cdot q = \frac{2 \cdot I_D \cdot \tau_n}{l}, \quad (40)$$

gdje je  $\tau_n$  vrijeme života elektrona, a  $S$  površina poprečnog presjeka sunčane ćelije.

U slučaju kad je  $l_d < l$ , šupljine i elektroni difuzijom dolaze do udaljenosti  $l_d$  a ostatak debljine i-sloja prevale pod utjecajem unutrašnjeg polja. Za gustoću elektrona i dalje vrijedi relacija (2.40) u uvjetima refleksije i (2.39) bez refleksije. Otpor  $R_s$  u uvjetima s povratnom difuzijom pri  $I=0$  iznosi

$$R_s = \frac{l^2}{I_D \cdot \mu_n \cdot \tau} = \frac{U_s}{I_D}, \quad (2.41)$$

a u uvjetima potpune refleksije kad  $I_D \rightarrow 0$

$$R_s = \frac{l^2}{2 \cdot I_D \cdot \mu_n \cdot \tau} = \frac{U_s}{I_D}. \quad (2.42)$$

Promjenom struje  $I$  od 0 do  $I_L$ ,  $U_s$  se smanjuje na polovinu svoga iznosa. Točna ovisnost između  $U_s$  i  $I$  nije poznata. Najbolja podudarnost s mjerenjima pokazala za ovisnost izražena relacijom

$$U_s(I) = U_s \left( 1 - 0,5 \cdot \sqrt{\frac{I}{I_L}} \right), \quad (2.43)$$

uz koju konačni oblik jednadžbe modela glasi:

$$U = -R_c \cdot I - \frac{U_s \left( 1 - 0,5 \cdot \sqrt{\frac{I}{I_L}} \right)}{\frac{I_L}{I} - 1} + m \cdot U_T \cdot \ln \left( 1 - \frac{I}{I_L} \right) + U_{ok}. \quad (2.44)$$

Izraz (2.43) je strujno naponska jednađba koja sadrži nepoznate veličine  $U_s$ ,  $R_c$  i  $m$  koje se mogu odrediti posebnim mjerenjima i koje su konstantne za sve radne uvjete modula. Promjenjive veličine: apsolutna temperatura  $T$ , napon otvorenog kruga  $U_{ok}$  i fotostruja  $I_L$  su ulazni podaci koji se lako izmjere uz pretpostavku da je fotostruja približno jednaka struji kratkog spoja,  $I_L \cong I_{ks}$ .

Eksplisito izračunavanje struje za zadani napon nije moguće jer je jednađba (2.44) transcendentna pa je potrebno primijeniti iteracijski postupak pomoću računala.

### 3. Sunčevo zračenje

Sunce je zvijezda u središtu našeg planetarnog sustava sastavljena uglavnom od vodika i helija. U unutrašnjosti Sunca vodik se nuklearnim reakcijama fuzije pretvara u helij što rezultira oslobađanjem velikih količina energije, a temperatura u jezgri premašuje 15000000 K. Zračenje iz unutrašnjosti u velikom dijelu apsorbira sloj vodika bliži površini pa je na površini Sunca temperatura oko 6000 K (točnije,  $5762 \pm 50$  K), a spektar Sunca približno odgovara spektru crnog tijela ugrijanog na temperaturu 5762 K. Stoga se temperatura od 5762 K može uzeti kao efektivna temperatura Sunčeve površine, a iz nje je primjenom Stefan-Boltzmannova, Wienova i Planckova zakona moguće proračunati energijski spektar Sunčeva zračenja. Snaga Sunčevog zračenja iznosi oko  $3,8 \cdot 10^{23}$  kW, od čega do Zemlje dopire oko  $1,7 \cdot 10^{14}$  kW. To znači da Zemlja u jednom satu od Sunca primi dovoljno energije za zadovoljenje svih svojih godišnjih energetske potrebe [7]. Prolaskom kroz svemir spektralni sadržaj Sunčevog zračenja gotovo da se i ne mijenja. Međutim, gustoća snage na nekom mjestu smanjuje se s kvadratom udaljenosti od Sunca po izrazu:

$$E_0 = \frac{R_s^2}{D^2} \cdot E_s, \quad (3.1)$$

gdje je  $E_0$  gustoća snage na promatranom mjestu,  $E_s$  gustoća snage na površini Sunca,  $R_s$  polumjer Sunca, a  $D$  udaljenost promatranog mjesta od Sunca. Sunčevo zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu naziva se ekstraterestičko zračenje i opisuje se gustoćom energijskog toka koji upada na površinu okomitu na smjer upadnih Sunčevih zraka. Ta veličina naziva se ozračenje ili iradijancija, označava se s  $E$  i izražava se jedinicom [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Kako se Zemlja oko Sunca giba po eliptičkoj putanji, to se i njihova međusobna udaljenost mijenja pa gustoća snage na ulazu u Zemljinu atmosferu nije konstantna već se mijenja od najmanje vrijednosti od  $1307 \text{ W}/\text{m}^2$  do najveće  $1399 \text{ W}/\text{m}^2$ . Srednja vrijednost ekstraterestičkog zračenja naziva se solarna konstanta, a definirana je kao tok Sunčeva zračenja kroz jediničnu površinu postavljenu okomito na smjer Sunčevih zraka na srednjoj udaljenosti Zemlje od Sunca ( $D=1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ ), ali izvan Zemljine atmosfere. [2] Solarna konstanta se određuje mjerenjem, a njena je vrijednost  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$  [8]. Prije ulaska u atmosferu, spektar Sunčeva zračenja obuhvaća valne duljine od oko 120 nm do preko 10  $\mu\text{m}$ . Zračenje je najveće na valnoj duljini  $\lambda=480 \text{ nm}$ , a obuhvaća ultraljubičasti (120-400

nm), vidljivi (400-750 nm) i infracrveni dio spektra ( $\lambda > 750$  nm). Ultraljubičasti dio spektra sadrži oko 8%, vidljivi oko 45%, a infracrveni oko 47% ukupne energije zračenja.

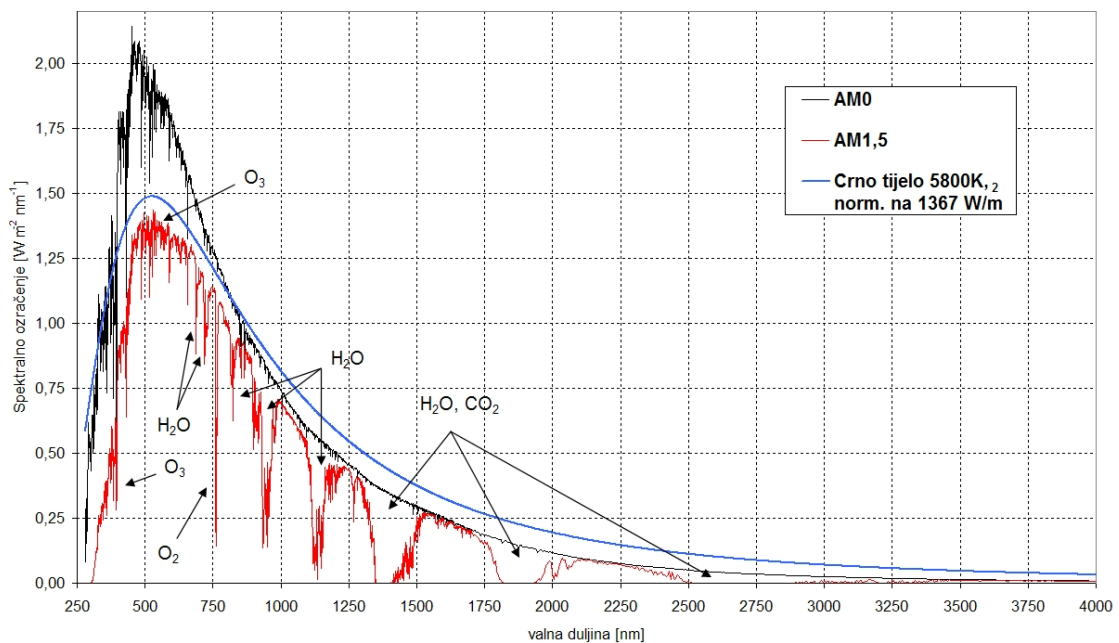
Za razliku od ekstraterestičkog zračenja čije su promjene vrlo male, Sunčevo zračenje na površini Zemlje jako je promjenjivo i ovisi o brojnim faktorima, od kojih su najvažniji [3]:

- atmosferski utjecaji, uključujući apsorpciju i raspršenje
- lokalne promjene u atmosferi, kao što su vodena para, oblaci i smog
- zemljopisni položaj
- vrijeme i datum

Prolaskom kroz atmosferu, dolazi do raspršenja i apsorpcije Sunčeva zračenja te ono slabi, a zbog nejednolikog utjecaja spomenutih efekata na različite valne duljine dolazi i do promjene spektralnog sadržaja. Do raspršenja dolazi zbog interakcije zračenja s česticama ili velikim molekulama plinova prisutnih u atmosferi što uzrokuje promjenu izvorne putanje zračenja. Raspršenje ovisi o valnoj duljini zračenja, koncentraciji čestica ili plinova te o udaljenosti koju zračenje prolazi kroz atmosferu. Razlikuju se tri vrste raspršenja [9]:

1. Rayleighovo raspršenje nastaje na česticama koje su vrlo male u usporedbi s valnom duljinom zračenja. To su najčešće sitne čestice prašine ili molekule vodika i dušika. Rayleighovo se raspršenje uglavnom javlja u višim slojevima atmosfere i puno više utječe na zračenje manjih valnih duljina. Posljedica tog raspršenja je da se prolaskom kroz atmosferu plava svjetlost više rasprši od ostalih valnih duljina pa se nebo čini plavim. Pri izlasku i zalazu Sunca, Sunčevo zračenje mora prijeći još duži put pa je raspršenje manjih valnih duljina još intenzivnije i tada veće valne duljine više dolaze do izražaja.
2. Mieovo raspršenje se događa u donjim dijelovima atmosfere i javlja se na česticama veličine usporedive s valnom duljinom zračenja: prašini, peludu, dimu, vodenoj pari. Mieovo raspršenje je dominantno kad je nebo oblačno.
3. Neselektivno raspršenje se javlja kad je veličina čestica mnogo veća od valne duljine zračenja, najčešće na vodenim kapljicama i velikim česticama prašine. Ovo raspršenje podjednako utječe na sve valne duljine, a posljedica je da se magla i oblaci čine bijelima zato jer su gotovo sve valne duljine podjednako raspršene.

Drugi mehanizam koji značajno mijenja Sunčevo zračenje je apsorpcija pri čemu molekule u atmosferi apsorbiraju energiju određenih valnih duljina. Za apsorpciju su uglavnom odgovorni ozon ( $O_3$ ), vodena para ( $H_2O$ ) i ugljični dioksid ( $CO_2$ ). Ozon ima vrlo važnu ulogu jer gotovo u potpunosti apsorbira ultraljubičasto zračenje valnih duljina manjih od 300 nm koje je štetno po zdravlje. Ugljični dioksid apsorbira infracrveno zračenje većih valnih duljina, a vodena para apsorbira znatan dio infracrvenog zračenja malih valnih duljina. Konačno, čitav spektar Sunčevog zračenja koji dolazi do površine Zemlje obuhvaća valne duljine od 300 nm do 2500 nm. Spektralna slika ekstraterestičkog i zračenja na površini Zemlje prikazana je na slici 3.1.



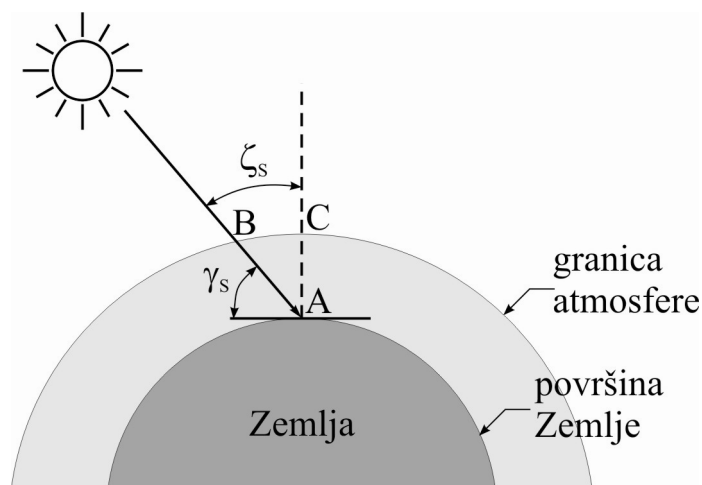
Slika 3.1. Ekstraterestičko zračenje (AM 0) i zračenje na površini Zemlje (AM 1,5) [14]

Najvažniji parametar koji određuje ukupnu snagu upadnog zračenja u uvjetima vedrog neba je put Sunčevih zraka kroz atmosferu. On je najkraći kad je Sunce točno iznad promatranog mjesta (u najvišoj točki na nebu). Omjer duljine puta koji prolaze upadne zrake i najkraćeg mogućeg puta Sunčevih zraka kroz atmosferu se naziva optička masa zraka i označava  $m$ . Vrijednost optičke mase zraka ovisi o visini Sunca  $\gamma_S$  i atmosferskom tlaku na mjestu promatranja  $p$ , koji ovisi o nadmorskoj visini mjesta. Ako se zanemari zakrivljenost Zemlje i lom Sunčevih zraka u atmosferi, uz pretpostavku da je gustoća atmosfere stalna, vrijedi:

$$m = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} = \frac{1}{\cos \zeta_s}, \quad (3.2)$$

$$m = \frac{\overline{BA}}{\overline{CA}} = \frac{1}{\sin \gamma_s} \quad (3.3)$$

gdje je  $\overline{CA}$  visina vertikalnog stupca zraka od površine Zemlje do ruba atmosfere (najkraći put Sunčevih zraka kroz atmosferu),  $\overline{BA}$  visina odgovarajućeg stupca zraka kroz koji prolaze Sunčeve zrake, a  $\gamma_s$  kut između upadnih Sunčevih zraka i horizontalne plohe (visina Sunca), slika 3.2.



Slika 3.2. Optička masa zraka [2]

Relacija koja uključuje zakrivljenost Zemlje i omogućuje precizniji proračun optičke mase zraka dana je s [8]:

$$m = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{1}{\sin \gamma_s + 0,50572 \cdot (\gamma_s + 6,07995^\circ)^{-1,6364}}, \quad (3.4)$$

gdje je  $p/p_0$  faktor korekcije tlaka zbog visine mjesta promatranja. Omjer  $p/p_0$  može se dovoljno precizno izračunati iz izraza:

$$\frac{p}{p_0} = e^{\frac{-z}{H_R}}, \quad (3.5)$$

gdje je  $z$  nadmorska visina promatranog mjesta u metrima, a  $H_R=8400$  m.

Kad Sunčeve zrake upadaju okomito na površinu Zemlje (nadmorska visina nula), tada je  $m=1$ , a u slučaju kad je kut između Sunčevih zraka i horizonta  $\alpha=30^\circ$ , optička masa zraka je  $m=2$ . Zračenje ovisno o optičkoj masi zraka se uobičajeno označava AM  $m$  (od



engl. Air Mass) pa se prema tome ekstraterestičko zračenje naziva AM 0 (eng. air mass zero), AM 1 je zračenje koje dolazi do površine mora ako je  $\alpha=90^\circ$ , AM 2 za  $\alpha=30^\circ$ , itd.

Kao normirano prizemno Sunčevo zračenje pri fotonaponskim mjerenjima predložena je tzv. AM 1,5 raspodjela zračenja po preporuci CEC (Commission of the European Communities). To je zračenje koje dolazi do površine mora ako je visina Sunca  $\gamma_S=41,8^\circ$ . Taj standardni spektar na površini Zemlje se još označava i AM 1,5 G (gdje G označava da se radi o ukupnom zračenju). Ako promatramo samo izravno zračenje tada se koristi oznaka AM 1,5 D i ono se može aproksimirati smanjujući AM 0 spektar za 28% (18% zbog apsorpcije i 10% zbog raspršenja). Ukupni spektar AM 1,5 G je 10% veći od spektra izravnog zračenja AM 1,5 D i proračuni za AM 1,5 G daju ozračenje približno  $970 \text{ W/m}^2$  [10]. Međutim, standardni AM 1,5 G spektar je normaliziran na vrijednost  $1 \text{ kW/m}^2$ .

Snaga koju daje fotonaponski sustav obasjan s AM 1,5 spektrom (tj. ozračenjem  $1 \text{ kW/m}^2$ ) zove se vršna snaga i svi parametri sustava se obično izražavaju s obzirom na to upadno zračenje.

### 3.1. Sunčevo zračenje na površini Zemlje

Ukupno oko 51% upadnog ekstraterestičkog zračenja dolazi do površine Zemlje, 26% se rasprši ili reflektira na oblacima i atmosferskim česticama, 19% zračenja se apsorbira, a oko 4% se reflektira od Zemljine površine nazad u svemir [11]. Atmosferski utjecaji na Sunčevo zračenje su višestruki, a za fotonaponske primjene najvažniji su:

- smanjenje snage upadnog zračenja zbog apsorpcije, raspršenja i refleksije;
- promjena spektralnog sadržaja zbog nejednolike apsorpcije, raspršenja i refleksije pojedinih valnih duljina;
- pojava raspršenja (difuzne) komponente Sunčevog zračenja;
- lokalne promjene u atmosferi (naoblaka, vodena para, smog) dodatno utječu na snagu, spektar i usmjerenost zračenja.

Svaka praktična primjena Sunčeve energije zahtijeva poznavanje iznosa i karakteristika zračenja koje je dostupno na promatranom mjestu u određenom trenutku ili vremenskom periodu. Za razliku od ekstraterestičkog zračenja koje ovisi uglavnom o međusobnom položaju Zemlje i Sunca te se njegov iznos može pronaći s priličnom

preciznošću, problem s određivanjem Sunčeva zračenja na površini Zemlje puno je složeniji. Mnoštvo je parametara koji utječu na iznos i spektar zračenja na površini Zemlje, a koje nije moguće potpuno točno odrediti. Glavni problem predstavljaju lokalne promjene u atmosferi, koje bitno utječu na iznos i karakteristike zračenja na promatranom mjestu. Rješenje je u primjeni dugotrajnih mjerenja i njihovoj detaljnoj analizi koja omogućuje razvoj odgovarajućih algoritama. Primjenom tako razvijenih algoritama, uz poznavanje astronomske geometrije, moguće je predvidjeti prostornu i vremensku raspodjelu Sunčevog zračenja na površini Zemlje s preciznošću određenom statističkim devijacijama.

Sunčevo zračenje ovisi o zemljopisnom položaju promatranog mjesta, o njegovim klimatskim i atmosferskim prilikama te o trenutku u danu i dobu u godini.

## **3.2. Prividno gibanje Sunca**

Za uspješno projektiranje sustava koji koriste Sunčevu energiju neophodno je poznavati karakteristike zračenja na promatranom mjestu. One su određene kako lokalnim atmosferskim uvjetima, tako i zemljopisnim položajem mjesta te trenutkom u kojem se razmatra zračenje. Zbog promjene međusobnog položaja Sunca i Zemlje, Sunčevo zračenje periodički se mijenja tijekom dana, mjeseca i godine pa je za bolje razumijevanje potrebno definirati osnovne parametre vezane uz Sunčevu geometriju. Iako se Zemlja giba oko Sunca, općenito je pogodnije promatrati prividno gibanje Sunca po nebu.

### **3.2.1. Lokalno i pravo Sunčevo vrijeme**

U konvencionalnom načinu računanja vremena, Zemlja je podijeljena u vremenske zone. Vrijeme izlaska i zalaska Sunca i dužina trajanja dana ovise o zemljopisnoj duljini i širini promatranog mjesta. Zemljopisna duljina određuje točno vrijeme izlaska i zalaska Sunca, dok je trajanje dana određeno samo datumom i zemljopisnom širinom. Pomicanjem prema istoku u istoj vremenskoj zoni, izlazak i zalazak Sunca javljaju se ranije, a vremenska razlika iznosi 4 min za svaki stupanj promjene valne duljine prema istoku. Uspostava vremenskih zona je bila nužna konvencija jer bi u suprotnom svako mjesto na

drugoj zemljopisnoj duljini imalo svoje zasebno vrijeme. Civilno vrijeme se još naziva i mjesno vrijeme i označavat će se s  $t_{mj}$ .

U proračunima i mjerenjima Sunčeva zračenja češće se koristi pravo Sunčevo vrijeme (dalje u tekstu koristit će se naziv sunčano vrijeme i oznaka  $t_s$ ). Podne je u sunčanom vremenu određeno onim trenutkom kad putanja Sunca na nebu siječe meridijan koji spaja sjeverni i južni pol. U tom trenutku Sunce je na najvišoj točki svoje putanje na nebu, a izlaz i zalaz Sunca su simetrično postavljeni na vremenskoj osi s obzirom na trenutak sunčanog podneva. Vrijeme izlaska i zalaska Sunca neovisno je o zemljopisnoj dužini.

Meteorološki prikaz Sunčevog zračenja općenito prikazuje podatke u intervalima od sat vremena po sunčanom vremenu pa je često potrebno izvršiti prijelaz iz mjesnog u sunčano vrijeme i obratno.

Mjesno vrijeme razlikuje se od sunčanog vremena zbog nepravilnosti Zemljine putanje i vrtnje i zbog ljudskih prilagobi u računanju vremena kao što su vremenske zone, ljetno i zimsko računanje vremena.

Referentni meridijan  $\lambda_{st}$  je meridijan mjesnog vremena i definira se za svaku vremensku zonu, a definiran je izrazom:

$$\lambda_{st} = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT}, \quad (3.6)$$

gdje je  $\Delta T_{GMT}$  razlika (u satima) između mjesnog i referentnog Greenwichkog vremena. Unutar jedne vremenske zone svaki pomak od  $1^\circ$  prema istoku znači povećanje vremena za  $1/15$  h (odnosno 4 min) pa se konačni izraz za prijelaz između mjesnog u sunčano vrijeme može zapisati kao:

$$t_s = t_{mj} + \Delta t_v + \frac{(\lambda - \lambda_{st})}{15} - c, \text{ [h]} \quad (3.7)$$

gdje je  $\Delta t_v$  korekcijski faktor zbog nepravilnosti Zemljine putanje koji se proračuna iz jednadžbe vremena,  $\lambda$  je zemljopisna duljina,  $\lambda_{st}$  je zemljopisna dužina referentnog meridijana (zemljopisne dužine na istoku uzimaju se s pozitivnim, a na zapadu s negativnim predznakom), a  $c$  je korekcija za ljetno vrijeme iznosa 1 h za područja u kojima se primjenjuje ljetno računanje vremena.

Vremenski sustav koji se koristi u proračunima geometrijskog položaja Sunca na nebu temelji se na rednom broju promatranog dana u godini  $j$  i na korištenju satnog kuta Sunca  $\omega$ , koji opisuje vremenski trenutak u danu, a računa se od sunčanog podneva. U sunčano podne satni kut Sunca iznosi  $\omega=0^\circ$ , a u ostalim trenucima računa se tako da se

vremenski interval od sunčanog podneva u satima pomnoži s  $15^\circ$ . Prijepodnevi satni kut ima negativan, a poslijepodnevi pozitivni predznak. [2]. Redni broj dana može imati vrijednosti od 1 do 365, odnosno 366 za prijestupne godine. Ako je  $i$  redni broj dana u mjesecu, tada se  $j$  može izračunati na način prikazan u Tablici 3.1.

Tablica 3.1. Proračunavanje rednog broja dana dana za  $i$ -ti dan u mjesecu [12].

Mjesec	$j$ za $i$ -ti dan mjeseca	Prijestupna godina
siječanj	$i$	
veljača	$31+i$	
ožujak	$59+i$	(+1)
travanj	$90+i$	(+1)
svibanj	$120+i$	(+1)
lipanj	$151+i$	(+1)
srpanj	$181+i$	(+1)
kolovoz	$212+i$	(+1)
rujan	$243+i$	(+1)
listopad	$273+i$	(+1)
studeni	$304+i$	(+1)
prosinac	$334+i$	(+1)

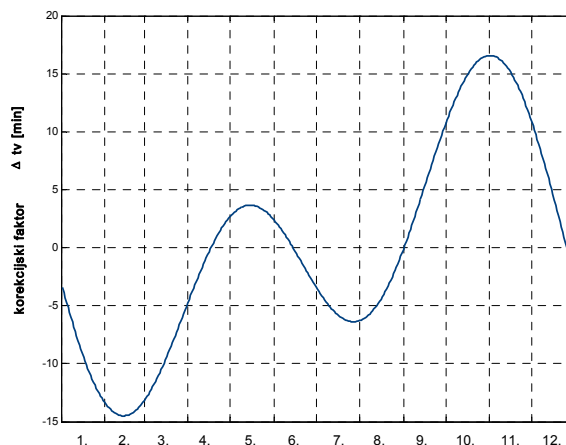
Određeni proračuni zahtijevaju pretvorbu rednog broja dana u tzv. dnevni kut,  $j'$ , što se postiže množenjem  $j$  s  $360^\circ$  i dijeljenjem s prosječnim brojem dana u godini (365,25 uzevši u obzir i prijestupne godine):

$$j' = j \cdot \frac{360^\circ}{365,25}. \quad (3.8)$$

Dnevni kut potreban je za proračunavanje korekcijskog faktora iz jednadžbe vremena koja glasi:

$$\Delta t_v = -0,128 \cdot \sin(j' - 0,04887) - 0,165 \cdot \sin(2j' + 0,34383). \quad (3.9)$$

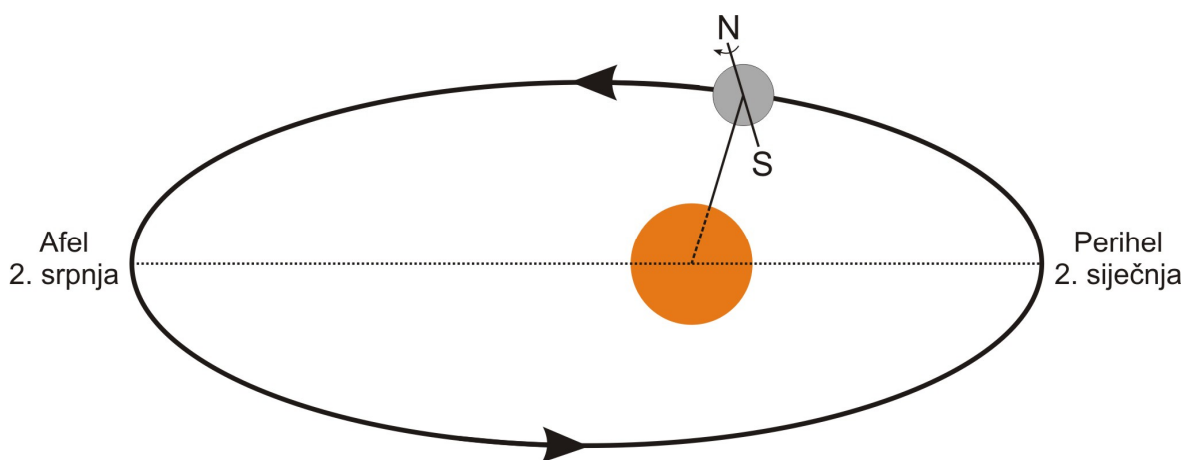
Jednadžba vremena prikazana je na slici 3.3.



Slika 3.3. Jednadžba vremena

### 3.2.2. Proračun ekstraterestičkog zračenja

Već je spomenuto da se ekstraterestičko zračenje, tj. zračenje na ulazu u Zemljinu atmosferu može prilično točno proračunati. Male promjene nastupaju zbog eliptičnosti Zemljine putanje oko Sunca. Tako je Zemlja nešto bliže Suncu za vrijeme zimskog perioda na sjevernoj polutci, a vrijeme najkraće udaljenosti nastupa 2. siječnja i naziva se Perihel. Kad je na sjevernoj polutci ljetno razdoblje, Zemlja je malo udaljenija od Sunca; najveća udaljenost nastupa 2. srpnja i naziva se Afel, slika 3.4.



Slika 3.4. Eliptička putanja Zemlje oko Sunca [8]

Udaljenost između Zemlje i Sunca mijenja se za  $\pm 1,7\%$ , a kako ozračenost ovisi o kvadratu udaljenosti, to znači da se ozračenost mijenja za  $\pm 3,3\%$  zbog čega se mijenja i solarna konstanta, ali za vrlo malu vrijednost – tijekom vremenskog perioda od 11,2 godina vrijednost solarne konstante se promijeni za otprilike  $1 \text{ W/m}^2$  [8].

Ekstraterestičko ozračenje horizontalne plohe može se izračunati iz izraza:

$$E_0 = \varepsilon \cdot 1367 \cdot \sin \gamma_S \text{ [W/m}^2\text{]}, \quad (3.10)$$

gdje je  $\gamma_S$  visina Sunca, a  $\varepsilon$  korekcijski faktor zbog nepravilnosti Zemljine putanje, koji je dan s:

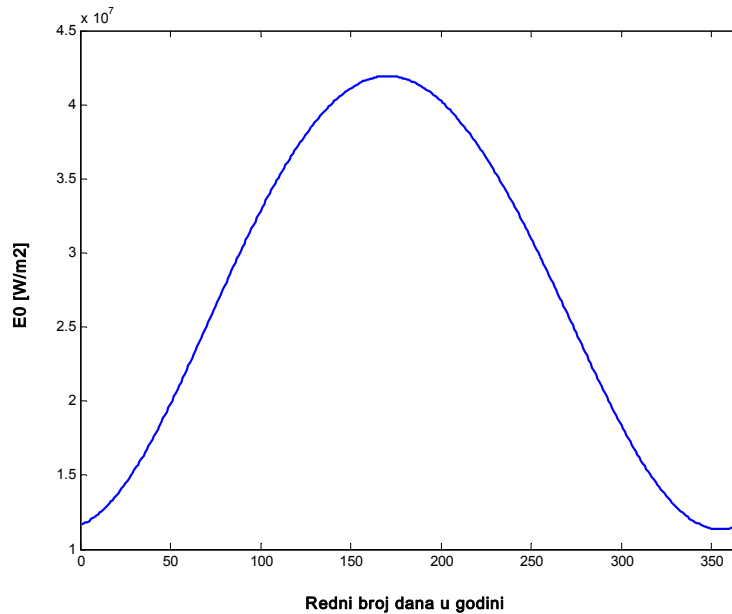
$$\varepsilon = 1 + 0,03344 \cdot \cos(j' - 2,80^\circ), \quad (3.11)$$

gdje je  $j'$  dnevni kut dan relacijom (3.8).

Ekstraterestička ozračenost horizontalne površine može se izračunati integriranjem ekstraterestičkog ozračenja po vremenu pa se za slučaj dnevnih vrijednosti može izračunati preko:

$$E_{0d} = 1367 \cdot \varepsilon \cdot \frac{86400}{\pi} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_s - \omega_s \cdot \cos \omega_s). \quad (3.12)$$

Na slici 3.5. prikazana je dnevna vrijednost ekstraterestičkog ozračenja horizontalne plohe za područje Splita.

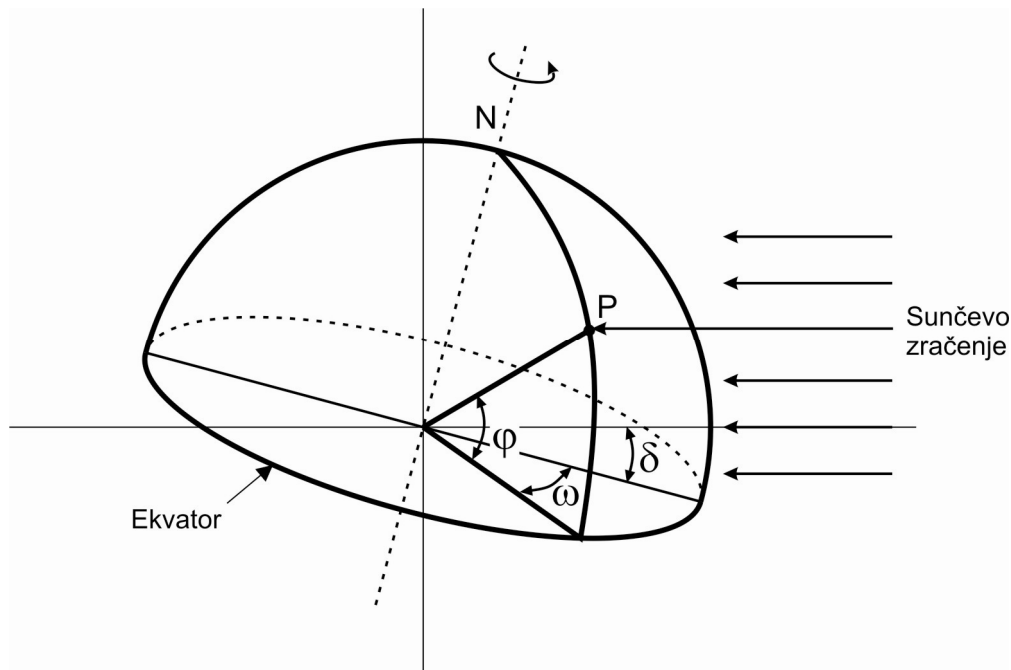


Slika 3.5. Ekstraterestičko ozračenje horizontalne plohe za područje Splita

Za dobijanje informacije o dostupnom Sunčevom zračenju na određenom mjestu i u određenom trenutku, potrebno je poznavati geometrijske parametre koji opisuju položaj Sunca na nebu. Tri su parametra osnovna za određivanje položaja Sunca s bilo koje točke promatranja na Zemlji: zemljopisna širina promatranog mjesta  $\varphi$ , redni broj dana  $j$  i trenutak promatranja izražen preko satnog kuta Sunca  $\omega$ .

### 3.2.3. Deklinacija Sunca.

Deklinacija Sunca  $\delta$  je glavni parametar potreban za proračunavanje položaja Sunca, a predstavlja kut između spojnice središta Zemlje i središta Sunca i ravnine u kojoj leži ekvator, slika 3.6.



Slika 3.6. Deklinacija Sunca

Os oko koje se Zemlja okreće nagnuta je pod kutem od  $23^{\circ}27'$  od vertikale pa deklinacija ima najveći iznos od  $23^{\circ}27'$  koji se na sjevernoj polutci javlja za ljetnog solsticija 21. lipnja. Najmanja deklinacija na sjevernoj polutci se javlja za zimskog solsticija 22. prosinca i iznosi  $-23^{\circ}27'$ . Iako se deklinacija mijenja kontinuirano, promjena vrijednosti unutar jednog dana dovoljno je mala da se može zanemariti pa je uobičajena praksa proračunavanje dnevnih vrijednosti deklinacije. Dnevne vrijednosti deklinacije koje predstavljaju srednje vrijednosti za period od 4 godine mogu se proračunati s dovoljnom preciznošću koristeći samo redni broj dana (tj. dnevni kut  $j'$ ) kao ulazni parametar pomoću izraza:

$$\delta = \sin^{-1}\{0,3978 \cdot \sin(j' - 80,2^{\circ} + 1,92 \cdot (\sin(j' - 2,80^{\circ})))\} \text{ [}^{\circ}\text{]} \quad (3.13)$$

U ovom radu korišten je algoritam koji omogućuje još precizniji proračun deklinacije za pojedini dan u sunčano podne, a koji kao ulazne parametre koristi redni broj dana  $j$ , broj godine  $y$  i zemljopisnu dužinu  $\lambda$ :

$$\delta = 0,0064979 + 0,405906 \cdot \sin \omega_t + 0,0020054 \cdot \sin 2\omega_t - 0,002988 \cdot \sin 3\omega_t - 0,0132296 \cdot \cos \omega_t + 0,0063809 \cdot \cos 2\omega_t + 0,0003508 \cdot \cos 3\omega_t, \quad (3.14)$$

gdje je:

$$\omega_t = \omega_0(j + t_1) \quad (3.15)$$

$$t_1 = -0,5 - \frac{\lambda}{2\pi} - n_0 \quad (3.16)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{365,2422} \quad (3.17)$$

$$n_0 = 78,8946 + 0,2422 \cdot (y - 1957) - INT\left(\frac{y - 1957}{4}\right), \quad (3.18)$$

gdje  $INT()$  označava cjelobrojnu vrijednost argumenta.

### 3.2.4. Visina Sunca. Sunčev azimut.

Poznavajući zemljopisnu širinu  $\varphi$ , satni kut Sunca  $\omega$  i deklinaciju  $\delta$  za određeni dan, može se proračunati položaj središta Sunčevog diska na nebu, tj. visina Sunca  $\gamma_S$  i Sunčev azimut  $\alpha_S$ .

Visina Sunca  $\gamma_S$  je kut između središta Sunčevog diska i horizontalne ravnine, a može se izračunati iz:

$$\gamma_S = \sin^{-1}(\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (3.19)$$

Kut komplementaran visini Sunca naziva se zenitna udaljenost, odnosno zenitni kut Sunca:

$$\zeta_S = 90^\circ - \gamma_S \quad (3.20)$$

Sunčev azimut  $\alpha_S$  je kut između vertikalne ravnine koja sadrži smjer Sunca i vertikalne ravnine koja prolazi smjerom sjever-jug. Sunčev azimut se mjeri od juga na sjevernoj, odnosno od sjevera na južnoj polutci. Azimut ima pozitivan predznak poslijepodne u sunčanom vremenu, dok prije sunčanog podneva poprima negativne vrijednosti. Korišteni algoritam za proračun Sunčevog azimuta dan je sljedećim relacijama:

$$\cos \alpha_S = \frac{\sin \varphi \cdot \sin \gamma_S - \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \gamma_S}, \quad (3.21)$$

$$\sin \alpha_S = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos \gamma_S}. \quad (3.22)$$

Ako je  $\sin \alpha_S < 0$ , tada je:

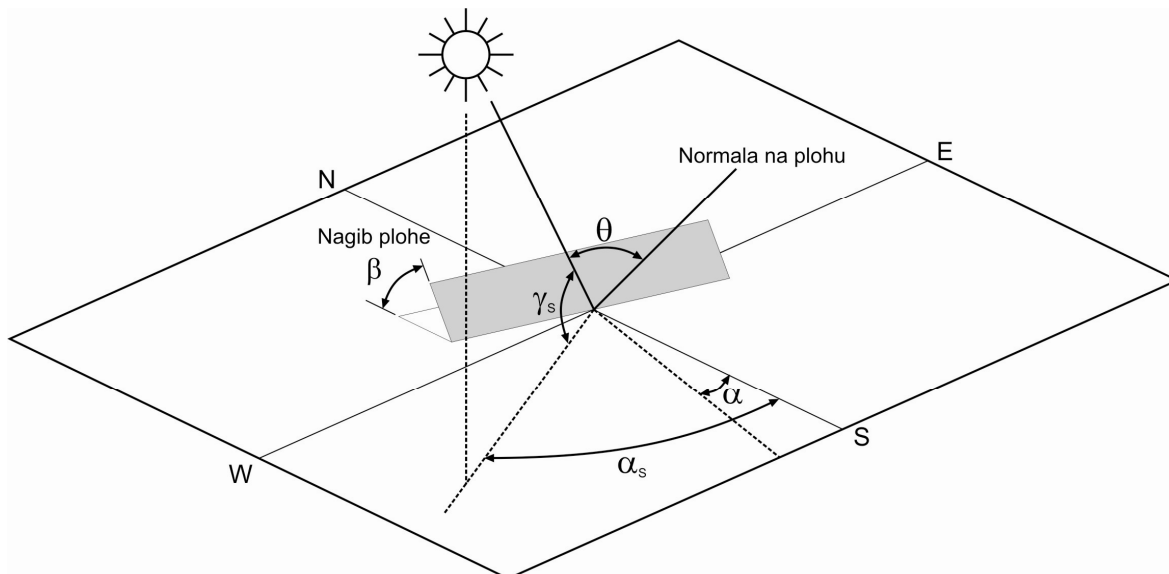
$$\alpha_S = -\cos^{-1}(\cos \alpha_S), \quad (3.23)$$

ako je  $\sin \alpha_S > 0$ , tada je:

$$\alpha_S = \cos^{-1}(\cos \alpha_S). \quad (3.24)$$

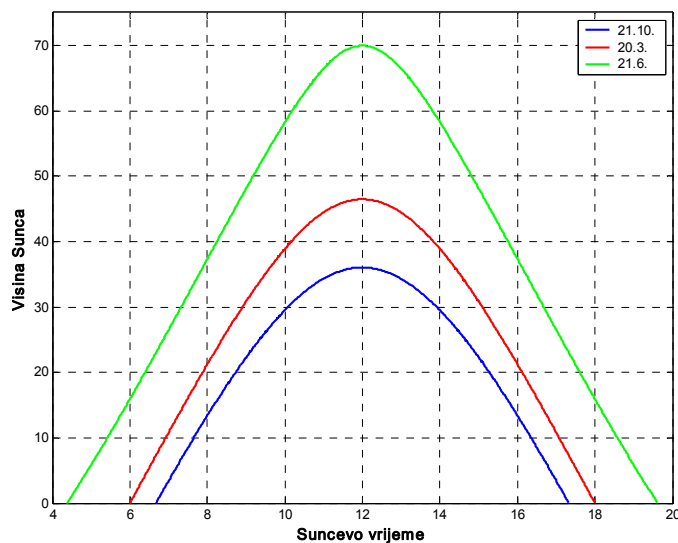
Visina Sunca, zenitni kut Sunca i Sunčev azimut prikazani su na slici 3.7.





Slika 3.7. Visina Sunca, zenitni kut Sunca, Sunčev azimut i kut upada

Na slici 3.8. prikazana je promjena visine Sunca tijekom za tri dana za područje Splita.



Slika 3.8. Promjena visine Sunca tijekom dana

### 3.2.5. Vrijeme izlaska i zalaska Sunca. Trajanje sunčanog dana.

Satni kut izlaska ( $+\omega_S$ ) i zalaska Sunca ( $-\omega_S$ ) predstavljaju one satne kutove pri kojima je visina Sunca  $\gamma_S=0$ . Uvrštavajući taj uvjet u relaciju (2.14.) dobija se za satni kut izlaska, odnosno zalaska Sunca izraz [12]:

$$\omega_S = \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta), \text{ uz uvjet da je } -1 < -\tan \varphi \cdot \tan \delta < 1, \quad (3.25)$$

gdje je  $\varphi$  zemljopisna širina, a  $\delta$  deklinacija Sunca.

Ako su satni kut izlaska i zalaska Sunca izraženi u radijanima, tada je sunčano vrijeme izlaska, odnosno zalaska Sunca [2]:

$$t_{izl} = 12 - \frac{12}{\pi} \omega_S \text{ [h]} \quad (3.26)$$

$$t_{zal} = 12 + \frac{12}{\pi} \omega_S \text{ [h]}. \quad (3.27)$$

Trajanje sunčanog dana  $S_{0d}$  može se izračunati kao razlika između vremena zalaska i izlaska Sunca:

$$S_{0d} = t_{zal} - t_{izl} = \frac{24}{\pi} \omega_S \text{ [h]}. \quad (3.28)$$

### 3.2.6. Kut upada Sunca

Kut upada Sunca  $\theta$  je kut između upadnih Sunčevih zraka i normale na plohu na koju upada zračenje. Pri tome je orijentacija plohe definirana njenim azimutom  $\alpha$  i nagibom plohe u odnosu na horizontalu  $\beta$ . Kut upada Sunca može se izračunati poznavanjem zemljopisne širine  $\varphi$ , satnog kuta Sunca  $\omega$  i deklinacije  $\delta$  i orijentacijom plohe [12]:

$$\Theta(\beta, \alpha) = \cos^{-1}(\cos \Theta^*(\beta, \alpha)), \text{ ako je } \cos \Theta^*(\beta, \alpha) > 0, \quad (3.29)$$

$$\Theta(\beta, \alpha) = 0, \text{ ako je } \cos \Theta^*(\beta, \alpha) \leq 0, \quad (3.30)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} \cos \Theta^*(\beta, \alpha) = & \cos \omega [\cos \delta (\cos \varphi \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta)] + \\ & + \sin \omega [\cos \delta \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta] + \sin \delta [\sin \varphi \cdot \cos \beta - \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha] \end{aligned} \quad (3.31)$$

### 3.3. Proračun Sunčeva zračenja

Zbog velikih promjena u iznosu i spektru Sunčeva zračenja tijekom dana i godine vjerodostojna procjena potencijala Sunčeve energije na nekom mjestu moguća je jedino na temelju rezultata dobivenih dugotrajnim mjerenjima. Rezultati istraživanja [13] pokazali su da se petogodišnji prosjek zračenja može za pojedini mjesec razlikovati i do 20% u odnosu na rezultate dobivene osamnaestogodišnjim mjerenjima, dok je za petnaestogodišnji niz ta

razlika dvostruko manja. Ukoliko se mjerenja vrše trideset godina pouzdanost podataka se povećava za dodatnih 40%.

Za praktičnu su primjenu Sunčeve energije potrebni podaci o ukupnom, izravnom i raspršenom zračenju na horizontalnu plohu.

Opširnija mjerenja Sunčeva zračenja na području Republike Hrvatske novijeg su datuma, a u našoj meteorološkoj praksi najduže je prisutno mjerenje dužine trajanja sijanja Sunca za koje postoje dugogodišnji rezultati. Na temelju tih rezultata moguće je primjenom različitih modela proračunati ozračenost horizontalne plohe. Relacija koja povezuje trajanje sijanja Sunca s ozračenosti horizontalne plohe poznata je kao Ångströмова relacija:

$$G_m = G_{0m} \left( a + b \left( \frac{S}{S_0} \right)_m \right), \quad (3.32)$$

gdje je  $G_m$  mjesečni prosjek dnevne ozračenosti horizontalne plohe,  $G_{0m}$  mjesečni prosjek dnevne ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe,  $(S/S_0)_m$  je mjesečni prosjek dnevnog omjera izmjerenog i maksimalnog trajanja sijanja Sunca, a  $a$  i  $b$  su koeficijenti koji ovise o klimatskim prilikama promatranog mjesta. Proračun koeficijenata  $a$  i  $b$  obično se radi za svaki pojedini mjesec, a za njihovo je precizno određivanje potrebno na promatranom mjestu istovremeno mjeriti i Sunčevo zračenje i trajanje sijanja Sunca. Poznati koeficijenti  $a$  i  $b$  mogu se primijeniti i na bliska područja s istim klimatskih prilikama, uz uvjet da nema zemljopisnih obilježja (planine, veće vodene površine) koje mogu značajnije utjecati na klimatske promjene.

Zbog neosjetljivosti Campbell-Stokes heliografa na upadno zračenje snage manje od  $200 \text{ W/m}^2$  (što je dosta česta situacija tijekom izlaska i zalaska Sunca kad Sunčeve zrake prolaze najdulji put kroz atmosferu), preporuča se maksimalno moguće trajanje sijanja Sunca (tzv. duljina astronomske dana) u relaciji (1) zamijeniti s trajanjem sijanja Sunca koje se izračuna za slučaj kad je horizont uvećan za  $\Delta\gamma_S$ . Uobičajeno se za  $\Delta\gamma_S$  uzima vrijednost od  $4^\circ$  jer ona odgovara snazi upadnog zračenja iznosa  $200 \text{ W/m}^2$  koliki je prag osjetljivosti Campbell-Stokes heliografa [12].

Omjer ukupne dnevne ozračenosti horizontalne plohe na Zemljinoj površini i ukupne dnevne ekstraterestičke ozračenosti naziva se faktor prozirnosti i označava s  $K_T$ :

$$K_T = \frac{G}{G_0}. \quad (3.33)$$

Indeks prozirnosti jedan je od najvažnijih parametara na kojem se temelje mnogi modeli za proračun Sunčeva zračenja. Drugi važan parametar je udio raspršenog zračenja u ukupnom  $K_d$  jer upravo iznos ukupnog i raspršenog zračenja predstavlja osnovne ulazne varijable za izračunavanje dnevnih i satnih vrijednosti zračenja na nagnute površine.

### 3.3.1. Proračun dnevne vrijednosti raspršenog zračenja na horizontalnu plohu

Iako je podatak o udjelu raspršenog zračenja u ukupnom od vrlo velikog značaja za korištenje Sunčeve energije u aktivnim, a posebno u pasivnim sustavima, raspršeno zračenje na horizontalnu plohu vrlo se rijetko mjeri pa je nužna primjena određenog algoritma. Ispitivanja algoritama kojima se difuzno ozračenje horizontalne plohe proračunava iz ukupnog ozračenja pokazala su ovisnost o mjestu promatranja što znači da se nijedan od ispitanih algoritama nije pokazao kao najbolji za sva promatrana mjesta [12].

### 3.3.2. Proračun mjesečnog prosjeka dnevne raspršene ozračenosti

Većina modela za proračun mjesečnog prosjeka dnevne raspršene ozračenosti horizontalne plohe koristi polinome prvog i trećeg reda po mjesečnom prosjeku dnevnog faktora prozirnosti  $(K_{Td})_m$ . Model čiji su autori Erbs, Klein i Duffie povezuje mjesečni prosjek dnevne raspršene ozračenosti horizontalne plohe i mjesečnog prosjeka dnevne ukupne raspršenosti horizontalne plohe [12]:

$$\frac{(D_d)_m}{(G_d)_m} = c_0 + c_1(K_{Td})_m + c_2(K_{Td})_m^2 + c_3(K_{Td})_m^3. \quad (3.34)$$

Spomenuti model vrijedi samo za iznose  $(K_{Td})_m$  između 0,3 i 0,8, a za mjesečne prosječne vrijednosti kuta izlaza/zalaza Sunca  $(\omega_s)_m > 81,4^\circ$  daje različite koeficijente. Ta je ograničenja popravio Czeplak uključivanjem utjecaja zemljopisnog položaja i godišnjeg doba. Koeficijenti  $c_0$ - $c_3$  dani su za tri zemljopisna pojasa i godišnja doba: zimu (od studenog do veljače), proljeće (ožujak i travanj), ljeto (od svibnja do kolovoza) i jesen (rujan i listopad) i prikazani su u Tablici 3.2.

Tablica 3.2. Koeficijenti za proračun mjesečnog prosjeka raspršene ozračenosti horizontalne plohe [12]

Zemljopisna širina	Godišnje doba	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	Interval ( $K_{Td}$ ) <sub>m</sub>
$61^\circ\text{N} > \varphi > 56^\circ\text{N}$	zima	1,061	-0,397	-2,975	2,583	[0,11-0,50]
	proljeće	0,974	-0,553	-1,304	0,877	[0,24-0,50]
	ljetno	1,131	-0,895	-1,616	1,555	[0,26-0,60]
	jesen	0,999	-0,788	-0,940	0,788	[0,21-0,51]
$56^\circ\text{N} > \varphi > 52^\circ\text{N}$	zima	1,002	-0,546	-1,867	1,490	[0,14-0,22]
	proljeće	1,011	-0,607	-1,441	1,075	[0,22-0,59]
	ljetno	1,056	-0,626	-1,676	1,317	[0,29-0,64]
	jesen	0,969	-0,624	-1,146	0,811	[0,23-0,53]
$\varphi \leq 52^\circ\text{N}$	zima	1,032	-0,694	-1,771	1,562	[0,15-0,51]
	proljeće	1,049	-0,822	-1,250	1,124	[0,23-0,61]
	ljetno	0,998	-0,583	-1,392	0,995	[0,27-0,63]
	jesen	1,019	-0,874	-0,964	0,909	[0,22-0,55]

### 3.3.3. Proračun dnevnog ozračenja horizontalne plohe

Kao najbolji model za proračun dnevne ozračenosti horizontalne plohe preporučena je Erbsova relacija [12]:

- za  $\omega_S < 81,4^\circ$

$$\frac{D_d}{G_d} = \begin{cases} 1 - 0,2727 \cdot K_{Td} + 2,4495 \cdot K_{Td}^2 - 11,9514 \cdot K_{Td}^3 + 9,3879 \cdot K_{Td}^4, & \text{za } K_{Td} < 0,715 \\ 0,143, & \text{za } K_{Td} \geq 0,715 \end{cases} \quad (3.35)$$

- za  $\omega_S \geq 81,4^\circ$

$$\frac{D_d}{G_d} = \begin{cases} 1 - 0,2832 \cdot K_{Td} - 2,5557 \cdot K_{Td}^2 + 0,8448 K_{Td}^3, & \text{za } K_{Td} < 0,722 \\ 0,175, & \text{za } K_{Td} \geq 0,722 \end{cases} \quad (3.36)$$

### 3.3.4. Proračun Sunčeva zračenja na nagnutu plohu

U većini slučajeva u praktičnim je primjenama ploha kolektora sunčanog uređaja orijentirana točno prema jugu (na sjevernoj Zemljinoj polutci) i nagnuta pod nekim kutom u odnosu na horizontalu pa je potrebno znati koliki iznos zračenja upada na tako nagnutu plohu. Osim toga, zanimljivo je i znati zračenje na plohu koja je osim nagiba u odnosu na horizontalu uz to još i pomaknuta od juga, tj. koja ima azimut  $\alpha \neq 0^\circ$ . Kako se zračenje na nagnutu plohu vrlo rijetko mjeri, do željenih se podataka uglavnom dolazi primjenom

razvijenih algoritama. Algoritmi za proračun zračenja na nagnutu plohu mogu se podijeliti u tri vrste:

- izotropni modeli kao što su Liu-Jordanov i Kleinov model pretpostavljaju da su i raspršena i reflektirana komponenta zračenja izotropne;
- anizotropni modeli prve generacije opisuju nebo uključujući pojam pojasa oko Sunca i/ili trake na horizontu; tu spadaju Buglerov, Klucherov, Hayov i Reindlov model;
- anizotropni modeli druge generacije još su složeniji: Gueymardov, Skartveit i Olsethov, Perezov i Muneerov.

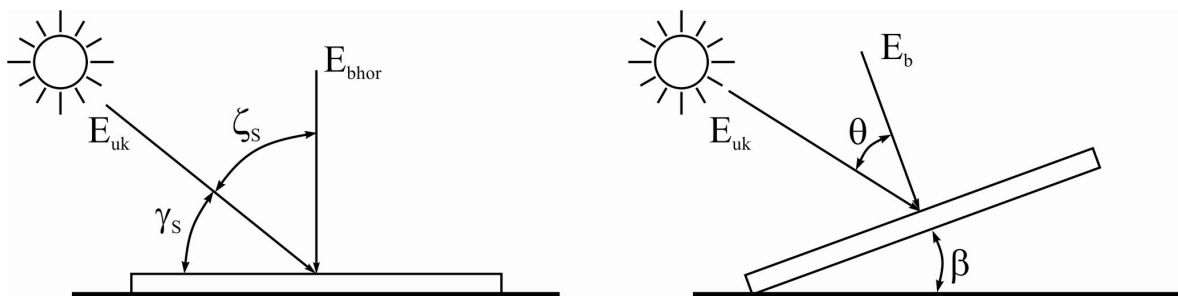
### 3.3.1.4. Izotropni modeli zračenja na nagnutu plohu

Liu, Jordan i Klein razvili su metodu kojom se mjesečni prosjek dnevne ozračenosti nagnute plohe može izračunati iz podataka o Sunčevom zračenju na horizontalnu plohu. Liu i Jordan su razvili model koji vrijedi za plohe usmjerene prema jugu, a Klein je poopćio na plohe proizvoljne orijentacije. Oba modela pretpostavljaju izotropnost neba, što je općenito vrlo gruba pretpostavka koja vrijedi samo za vedre dane bez oblaka.

Ukupno ozračenje plohe koja je orijentirana prema jugu i nagnuta za kut  $\beta$  u odnosu na horizontalu sastoji se od tri komponente: izravnog ozračenja  $E_b(\beta)$ , raspršenog ozračenja  $E_d(\beta)$  i od zračenja reflektiranog od tla i okolnih objekata  $E_r(\beta)$ :

$$E_g(\beta) = E_b(\beta) + E_d(\beta) + E_r(\beta). \quad (3.37)$$

Ako se ukupno upadno izravno zračenje označi s  $E_{uk}$  tada je izravno zračenje na horizontalnu plohu funkcija zenitne udaljenosti, odnosno visine Sunca  $\alpha_s$ . Istovjetno, izravno zračenje na nagnutu plohu ovisi o kutu  $\theta$  pod kojim Sunčeve zrake upadaju na plohu (odnosno o nagibu plohe  $\beta$ ), slika 3.9.



Slika 3.9. Izravno Sunčevo zračenje na horizontalnu i nagnutu plohu

Prema slici 3.9. može se pisati:

$$E_{bhor} = E_{uk} \cdot \sin \gamma_S = E_{uk} \cdot \cos \zeta_S \Rightarrow E_{uk} = \frac{E_{bhor}}{\cos \zeta_S}, \quad (3.38)$$

$$E_b = E_{uk} \cdot \cos \theta = E_{bhor} \frac{\cos \theta}{\cos \zeta_S}. \quad (3.39)$$

Omjer izravnog ozračenja nagnute plohe  $E_b$  i izravnog ozračenja horizontalne plohe  $E_{bhor}$  predstavlja tzv. nagibni koeficijent izravnog zračenja i označava se s  $R_b$ :

$$R_b = \frac{E_b}{E_{bhor}} = \frac{\cos \theta}{\cos \zeta_S}. \quad (3.40)$$

Uvrštavanjem poznatih izraza za  $\theta$  i  $\zeta_S$ :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta}. \quad (3.41)$$

Nagibni koeficijent izravnog ozračenja  $R_b$  ovisi o položaju Sunca na nebu i kutu nagiba plohe i obično se računaju za svaki sat od izlaska do zalaska Sunca. Dnevne vrijednosti koeficijenta  $R_{bd}$  dobiju se integriranjem po cijelom Sunčevom danu te se za plohe okrenute prema jugu mogu izračunati pomoću izraza [2]:

$$R_{bd} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega'_S + \frac{\pi}{180} \omega'_S \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_S + \frac{\pi}{180} \omega_S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta}, \quad (3.42)$$

gdje je  $\omega_S = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta)$  kut izlaska (zalaska) Sunca na horizontalnu plohu, a  $\omega'_S = \min\{\omega_S, \arccos[-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan \delta]\}$  kut izlaska (zalaska) Sunca na nagnutu plohu.

Ozračenje nagnute plohe raspršenim zračenjem  $E_d(\beta)$  razlikuje se od raspršenog ozračenja horizontalne plohe  $E_{dhor}$  jer na nagnutu plohu ne upada zračenje iz cijele hemisfere iznad tla nego samo od jednog njezinog dijela. Uz pretpostavku izotropnosti raspršenog zračenja tada je ozračenje nagnute plohe proporcionalno kutu pod kojim se s nje vidi nebo pa vrijedi:

$$E_d(\beta) = E_{dhor} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (3.43)$$

gdje je  $\beta$  kut pod kojim je ploha nagnuta u odnosu na horizontalu.

Uz izravnu i raspršenu, na nagnutu plohu upada još i zračenje odbijeno s tla i okolnih objekata. Ako je  $\rho$  refleksijski faktor tla (koji se još naziva i albedo) i okolnih objekata tada je ozračenje nagnute plohe reflektiranim zračenjem:

$$E_r(\beta) = \rho \cdot (E_{bhor} + E_{dhor}) \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (3.44)$$

Refleksijski faktor tla za neke površine dan je u Tablici 3.3.

Tablica 3.3. Refleksijski faktor tla za karakteristične površine [14]

Površina	Albedo
snijeg, svjež	0,75
vodene površine	0,07
zemlja	0,14
zemljani put	0,04
crnogorična šuma zimi	0,07
šuma u proljeće, obrađena polja	0,26
istrošen asfalt	0,10
istrošen beton	0,22
suho lišće	0,30
suha trava	0,20
zelena trava	0,26
bitumenzni krov	0,13
lomljeni kamen	0,20
zgrade, tamne (crvena cigla, tamna fasadna boja)	0,27
zgrade, svijetle (svijetla cigla, svijetla fasadna boja)	0,60

Konačno, zbrajanjem svih komponentata Sunčevog zračenja, ozračenost plohe koja je nagnuta za kut  $\beta$  u odnosu na horizontalu iznosi:

$$E_{uk}(\beta) = E_b(\beta) + E_d(\beta) + E_r(\beta) = R_b \cdot E_{bhor} + \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot E_{dhor} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot (E_{bhor} + E_{dhor}). \quad (3.45)$$

Za horizontalnu plohu vrijedi:

$$E_{ukhor} = E_{bhor} + E_{dhor} \Rightarrow E_{bhor} = E_{ukhor} - E_{dhor}. \quad (3.46)$$

Uvrštavajući (3.46) u (3.45) dobija se:

$$E_{uk}(\beta) = R_b \cdot (E_{ukhor} - E_{dhor}) + \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot E_{dhor} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot E_{ukhor}, \quad (3.47)$$

$$E_{uk}(\beta) = \left[ R_b \cdot \left( 1 - \frac{E_{dhor}}{E_{ukhor}} \right) + \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \frac{E_{dhor}}{E_{ukhor}} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \cdot E_{ukhor} = R_g \cdot E_{ukhor}, \quad (3.48)$$

gdje je  $R_g$  nagibni koeficijent ukupnog ozračenja. Ako se  $R_g$  računa za svaki pojedini dan:

$$R_g = R_{bd} \cdot \left( 1 - \frac{(E_{dhor})_d}{(E_{ukhor})_d} \right) + \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \frac{(E_{dhor})_d}{(E_{ukhor})_d} + \rho \cdot \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (3.49)$$

Liu-Jordanov izraz za proračun nagibnog koeficijenta izravnog ozračenja  $R_b$  prema (3.41) nadopunio je Klein za plohe koje nisu orijentirane izravno prema jugu pa je [15]:

$$R_b = \left\{ \cos \beta \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (\omega_{ss} - \omega_{sr}) - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\pi}{180} \cdot (\omega_{ss} - \omega_{sr}) + \right.$$



$$\begin{aligned}
& + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \beta \cdot (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) + \cos \delta \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - \\
& - \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \cdot \left\{ 2 \cdot \left( \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi}{180} \cdot \omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \right\}^{-1}, \quad (3.50)
\end{aligned}$$

gdje je  $\alpha$  azimut plohe (negativan prema istoku, pozitivan prema zapadu),  $\omega_{sr}$  je kut izlaza, a  $\omega_{ss}$  kut zalaza Sunca na nagnutu plohu. Kut izlaza, odnosno zalaza Sunca na nagnutu plohu dani su s:

- ako je  $\alpha > 0$

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \arccos \left( \frac{AC + \sqrt{A^2 - C^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right\}, \quad (3.51)$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left( \frac{AC - \sqrt{A^2 - C^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right\}, \quad (3.52)$$

- ako je  $\alpha < 0$

$$\omega_{sr} = -\min \left\{ \omega_s, \arccos \left( \frac{AC - \sqrt{A^2 - C^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right\}, \quad (3.53)$$

$$\omega_{ss} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left( \frac{AC + \sqrt{A^2 - C^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right\}, \quad (3.54)$$

gdje je:

$$A = \frac{\cos \varphi}{\sin \alpha \cdot \tan \beta} + \frac{\sin \varphi}{\tan \alpha}, \quad (3.55)$$

$$C = \tan \delta \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{\tan \alpha} - \frac{\sin \varphi}{\sin \alpha \cdot \tan \beta} \right). \quad (3.56)$$

Treba napomenuti da Kleinov model vrijedi za plohe s azimutom između  $-90^\circ$  i  $+90^\circ$ .

## 4. Mjerenje Sunčeva zračenja

Sunčevo zračenje koje upada na Zemljinu površinu sastoji se od tri komponente:

- izravnog Sunčevog zračenja koje se ne raspršuje u atmosferi i dolazi u paralelnim zrakama izravno iz smjera Sunca na nebu;
- raspršenog (difuznog) Sunčevog zračenja koje nastaje raspršenjem u atmosferi i dolazi iz svih smjerova neba;
- odbijenog (reflektiranog) Sunčeva zračenja od tla i okolnih objekata.

Za praktične primjene Sunčeve energije potrebno je poznavati karakteristike Sunčeva zračenja na promatranom mjestu, a one su određene zemljopisnim položajem mjesta, trenutkom promatranja i lokalnim atmosferskim prilikama. Pri tome najveću poteškoću predstavlja nemogućnost egzaktnog određivanja i prognoziranja utjecaja atmosferskih prilika. Stoga se pouzdana procjena potencijala Sunčeve energije na promatranom mjestu može dobiti tek dugotrajnim mjerenjem Sunčeva zračenja (10 i više godina). Temeljem tih mjerenja mogu se razviti odgovarajući algoritmi koji omogućuju proračun Sunčeva zračenja na lokacijama sa sličnim klimatskim uvjetima. Osim mjerenja koja se vrše na promatranom mjestu, Sunčevo zračenje može se odrediti i iz satelitskih snimki.

### 4.1. Mjerenje Sunčeva zračenja na Zemlji

Četiri su osnovne vrste mjerenja Sunčeva zračenja [14]:

- mjerenje heliografom daje podatke o insolaciji, tj. trajanju sijanja Sunca;
- mjerenje pirheliometrom daje podatke o kratkovalnom izravnom zračenju;
- mjerenje piranometrom daje podatke o kratkovalnom zračenju koje prima iz hemisfere;
- mjerenje pirgeometrom daje podatke o dugovalnom zračenju Zemlje.

#### 4.1.1. Mjerenje trajanja sisanja Sunca (insolacije)

Trajanje sisanja Sunca je vrijeme tijekom kojeg Sunčevu zračenje dopire do Zemljine površine, odnosno do plohe mjernog uređaja. Najjednostavniji i najrašireniji uređaj za mjerenje trajanja sisanja Sunca je Campbell-Stokesov heliograf, slika 4.1.



*Slika 4.1. Campbell-Stokesov heliograf*

Glavni dio uređaja je staklena kugla koja fokusira Sunčeve zrake na papirnu traku za snimanje te, ukoliko je intenzitet upadnog Sunčevog zračenja dovoljno velik, na traci ostavlja izgoreni trag. Sunčevu zračenje je registrirano ako prelazi prag snage od oko  $120 \text{ W/m}^2$ . Nedostatak heliografa je u tome što ne daje podatke o iznosu i udjelu pojedine komponente Sunčevog zračenja. Međutim, ukoliko ne postoje drugi izmjereni podaci, iz podataka o trajanju sisanja Sunca moguće je primjenom odgovarajućih modela proračunati ozračenost. Nedostaci vezani uz preciznost mjerenja heliografom mogu se opisati s četiri najvažnije vrste pogrešaka:

- greška zbog neregistriranog kratkotrajnog slabljenja Sunčevog zračenja zbog čega instrument zabilježi veću vrijednost trajanja sisanja Sunca;
- prag osjetljivosti uređaja od  $120 \text{ W/m}^2$  rezultira snimanjem manje vrijednosti trajanja sisanja Sunca od stvarnog;
- analiza papirnih traka koje se koriste za snimanje trajanja sisanja Sunca vrši se ručno, što može izazvati dodatne pogreške u procjeni trajanja sisanja Sunca;

- pogoršanje karakteristika staklene kugle zbog vremenskih utjecaja kao što su kiša ili mraz te zbog nedovoljnog održavanja zbog čega dolazi do bilježenja manje vrijednosti trajanja sijanja Sunca.

Moderni instrumenti za mjerenje trajanja sijanja Sunca koriste fotoelektrični efekt u kombinaciji s digitalnim izlazom kojim se omogućuje izravno povezivanje uređaja s računalom. Na taj način smanjene su moguće pogreške, osim pogreške zbog zaprljanosti instrumenta. Prag od  $120 \text{ W/m}^2$  sačuvan je zbog konvencije Svjetske meteorološke udruge kojom se želi omogućiti usporedno korištenje podataka dobivenih različitim vrstama uređaja.

#### 4.1.2. Mjerenje zračenja piranometrom i pirheliometrom

Sunčevo zračenje na horizontalnu površinu obično se mjeri piranometrom. Najčešće se koristi piranometar koji za osjetno tijelo ima termočlanke, slika 4.2.. Sunčevo zračenje iz cijele hemisfere apsorbira se u središnjem crno obojanom disku, a toplina se prenosi preko termičkog otpora do tijela piranometra koje služi i za odvod topline. Temperaturna razlika na termičkom otporu diska pretvara se u napon. Termički detektor bilježi ukupnu upadnu snagu pa je osjetljiv i na dugovalno infracrveno zračenje. Međutim, od tog je zračenja, kao i od atmosferskih utjecaja zaštićen s dvije staklene kupole, a one ujedno omogućuju podjednako propuštanje izravne komponente iz bilo kojeg smjera na nebu. Preciznost ovakvih piranometara općenito je oko 2%.



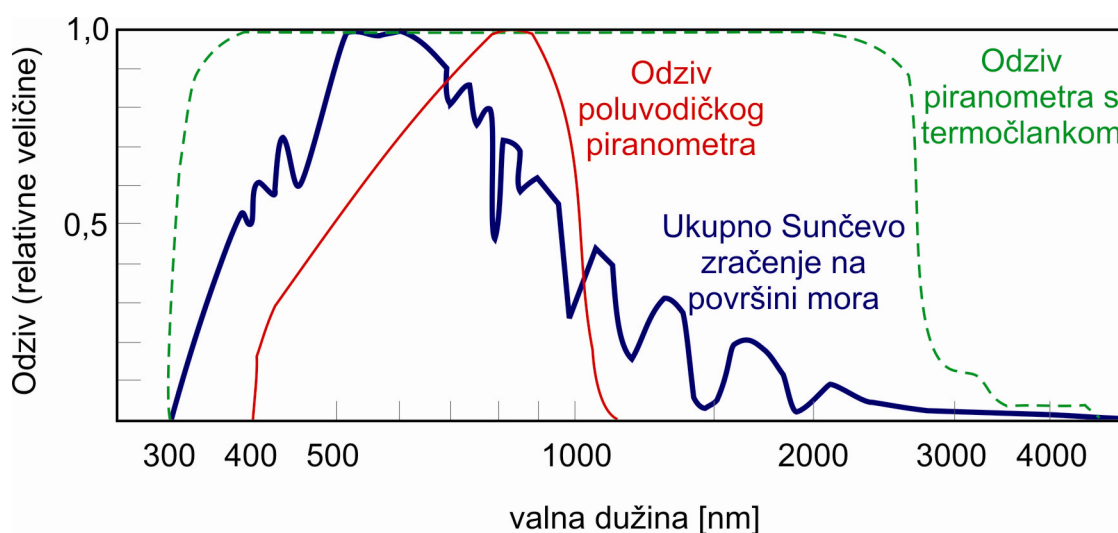
*Slika 4.2. Piranometar s termočlankom Kipp&Zonen CM 11*

Osim piranometara s termočlankom, postoje i piranometri s poluvodičkim osjetnim tijelom. Njihova je preciznost puno manja jer su limitirani spektralnim odzivom poluvodičkog materijala. Poluvodički piranometri su prilično jednostavni za upotrebu, a

cijena im je nekoliko puta manja od piranometara s termočlankom i predstavljaju privlačnu alternativu za primjene u kojima nije potrebna velika preciznost mjerenja Sunčeva zračenja. Jedan poluvodički piranometar čiji je osjetnik silicijska fotodioda prikazan je na slici 4.3., a njegov spektralni odziv prikazan je usporedo sa spektralnim odzivom piranometra s termočlankom na slici 4.4.



Slika 4.3. Silicijski poluvodički piranometar Kipp&Zonen SP Lite



Slika 4.4. Spektralni odziv poluvodičkog i piranometra s termočlankom [14]

Piranometri mjere ukupno zračenje koje upada na njihovu površinu iz svih smjerova neba. Mogu se koristiti i za mjerenje raspršenog (difuznog) zračenja, tako da se spriječi upadanje izravne komponente zračenja na površinu osjetnika. Najčešće se koriste prsteni za zasjenjivanje koji se postavljaju tako da prate gibanje Sunca po nebu i tijekom čitavog dana drže osjetnu površinu piranometra zasjenjenom. Korištenje takvih uređaja zahtijeva podešavanje svakih nekoliko dana kako bi se izvršila korekcija zbog promjene u Sunčevoj putanji. Nedostatak ove metode je u tome što prsten za zasjenjivanje osim Sunčevog diska zaklanja i dio neba pa je u konačnici potrebno izvršiti određenu korekciju

rezultata. Preciznije mjerenje raspršene komponente Sunčeva zračenja moguće je primjenom kuglice za zasjenjivanje koja se pomiče tijekom dana prateći putanju Sunca te drži osjetljivi dio piranometra zaklonjen od izravne komponente Sunčeva zračenja. Glavni je nedostatak ovog uređaja njegova skupoća jer je potrebno imati sustav za automatsko praćenje gibanja Sunca po nebu.

Izravna komponenta Sunčevog zračenja mjeri se pirheliometrom, slika 4.5. Osjetno tijelo pirheliometra je također najčešće termočlanak, ali je smješten u valjkasto kućište s uskim otvorom na vrhu. Kroz taj otvor upada izravno Sunčevo zračenje pa je pirheliometar potrebno precizno podesiti tako da je uvijek otvorom okrenut prema Sunčevom disku na nebu. Noviji pirheliometri obično se koriste u kombinaciji s uređajima za praćenje Sunca pa su vrlo skupi. Nažalost, u meteorološkoj praksi je upotreba pirheliometara za precizno mjerenje izravne komponente Sunčeva zračenja još uvijek vrlo rijetka pa se do nje i dalje najčešće dolazi proračunom (razlika ukupnog i raspršenog zračenja).



*Slika 4.5. Pirheliometar Kipp&Zonen CH1*

#### **4.1.3. Mjerenje dugovalnog zračenja Zemlje**

Za mjerenje dugovalnog zračenja Zemlje koriste se pirgeometri koji se razlikuju od piranometara u izvedbi kupole, koja je izrađena tako da reflektira što je moguće više kratkovalnog zračenja. Koriste se materijali koji propuštaju samo infracrveno zračenje valnih duljina 3-50  $\mu\text{m}$ . Ipak, oko 3% kratkovalnog zračenja prođe kroz kupolu i povećava signal koji daje termočlanak pa je s pirgeometrima potrebno koristiti disk za zasjenjivanje.

## 4.2. Mjerenje komponenata Sunčevog zračenja

Pouzdana procjena potencijala Sunčeve energije na nekom mjestu i učinkovito projektiranje sustava za korištenje energije Sunca mogući su jedino na temelju pouzdanih podataka o Sunčevom zračenju. Pritom je za praktične primjene potrebno osim ukupnog poznavati i iznos i vremensku ovisnost pojedine komponente Sunčeva zračenja (primjerice, za koncentrirajuće sustave treba poznavati izravnu komponentu zračenja). U praksi je uobičajeno mjerenje ukupnog i izravnog ili raspršenog zračenja na horizontalnu plohu iz kojih se pomoću nekog od mnogih modela može proračunati zračenje na plohu proizvoljne orijentacije. Međutim, primjena i verifikacija pojedinog modela moguća je samo uz eksperimentalnu potvrdu za što je potrebno raspolagati dugogodišnjim nizom izmjerenih podataka. Nažalost, u Republici Hrvatskoj Sunčevo zračenje se ne mjeri dovoljno dugo ni detaljno. Dugogodišnji podaci mjerenja postoje samo za trajanje sijanja Sunca, dok se ukupno zračenje mjeri relativno kratko i na malom broju mjernih postaja. Zbog toga je Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje iz Splita u suradnji s Energetskim institutom "Hrvoje Požar" započeo s vlastitim mjerenjima Sunčeva zračenja. Glavni je njihov cilj uspostava dugotrajnih i pouzdanih mjerenja koja će omogućiti ispitivanje postojećih i razvoj novih modela te dati potpuniju sliku o mogućnostima korištenja Sunčeve energije u splitskom području.

Ukupno Sunčevo zračenje koje upada na horizontalnu plohu  $G$  sastoji se od izravnog zračenja  $B_n$  koje upada na plohu izravno iz smjera Sunca pod kutom  $\gamma_S$  i raspršenog zračenja  $D$ :

$$G = B + D = B_n \cdot \sin \gamma_S + D . \quad (4.1)$$

To znači da je osim mjerenja ukupnog zračenja potrebno mjeriti još jednu komponentu kako bi se mogla proračunati preostala. Mjerenje ukupnog zračenja pomoću piranometra je dosta rašireno jer je postavljanje uređaja u rad i njegovo održavanje prilično jednostavno. Međutim, mjerenje izravne komponente Sunčeva zračenja pirheliometrom puno je složenije. Glavni razlog je u činjenici da pirheliometar mora uvijek biti usmjeren točno prema Suncu pa je tijekom dužeg vremenskog perioda i po svim vremenskim uvjetima potrebno osigurati precizno praćenje Sunčeva gibanja po nebu. Uređaji za praćenje su prilično skupi i zahtjevni su za održavanje jer je potrebno vršiti provjeru ispravnosti praćenja Sunčeve putanje. Uz to, pirheliometri su i puno osjetljiviji na prašinu od piranometara. Stoga su mjerenja izravne komponente Sunčeva zračenja prilično rijetka.

Druga mogućnost je mjerenje raspršenog zračenja koristeći piranometar i uređaj za zasjenjivanje koji onemogućuje upad izravne komponente na osjetno tijelo piranometra. Najčešće se za zasjenjivanje koristi prsten koji se postavlja tako da je osjetno tijelo piranometra u sjeni tijekom čitavog dana. S promjenom deklinacije, potrebno je svakih nekoliko dana podesiti prsten. Glavni nedostatak ovog mjerenja je u tome što prsten osim izravne komponente blokira i dio raspršenog zračenja pa je izmjerene vrijednosti potrebno korigirati.

### 4.3. Mjerenje komponenata Sunčeva zračenja multipiranometarskim nizom

Vođeni spomenutim nedostacima mjerenja izravnog i raspršenog zračenja grupa autora [16] predložila je rješenje upotrebom tzv. metode multipiranometarskog niza. Metoda se temelji na istovremenom mjerenju ukupnog ozračenja s nekoliko nepomičnih različito usmjerenih piranometara i primjenom algoritma iz kojeg se proračuna izravno zračenje. Steinmüller je ispitivao sustav s dva [17], a Faiman s tri, četiri i pet instrumenta [16], [18], [19]. Ideja se sastoji u prikazivanju ozračenosti svakog od piranometara kao linearne kombinacije izravne, raspršene i reflektirane ozračenosti. Kako bi se eliminirala reflektirana komponenta i olakšao proračun preporuča se upotreba zaštitnih maski koje predstavljaju umjetni horizont za svaki pojedini instrument. U suprotnom je potrebno poznavati i albedo za svaki od piranometara što bi znatno povećalo složenost sustava. Ako se primijene maske za zasjenjivanje, ukupna ozračenost svakog od piranometara  $G$  sastoji se od izravne i raspršene ozračenosti,  $B$  i  $D$  [19]:

$$G(D, B) = b \cdot B + d \cdot D, \quad (4.2)$$

gdje su koeficijenti  $b$  i  $d$  definirani Sunčevom i geometrijom sustava piranometara te primijenjenim modelom zračenja. Ako se pretpostavi da je raspršeno zračenje izotropno, tada su koeficijenti  $b$  i  $d$  dani s:

$$b = \cos \theta, \quad (4.3)$$

$$d = \frac{1 + \cos \beta}{2}, \quad (4.4)$$

gdje je  $\theta$  kut upada zračenja, a  $\beta$  kut nagiba instrumenta.



Mjerenjem vrijednosti  $G$  i proračunom parametara  $b$  i  $d$  dovoljna su dva piranometra za proračun komponenata  $B$  i  $D$ . Međutim, primjenom više instrumenata značajno se smanjuje mogućnost pogreške u mjerenju i primijenjenom modelu. Faiman preporuča sustav od četiri piranometra [16]. U tom slučaju je sustav jednadžbi predeterminiran pa se metodom najmanjih kvadrata proračunaju vrijednosti  $B$  i  $D$ .

#### 4.4. Sustav za mjerenje Sunčeva zračenja na FESB-u

Sustav za mjerenje komponenata Sunčeva zračenja instaliran je na krovu zgrade Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu i sastoji se od:

- piranometra s termočlankom za mjerenje ukupnog zračenja na horizontalnu plohu;
- piranometra s termočlankom s prstenom za zasjenjivanje za mjerenje raspršenog zračenja na horizontalnu plohu;
- niza od četiri piranometra s termočlankom;
- niza od četiri poluvodička piranometra;
- standardnih meteoroloških senzora za mjerenje temperature, vlage, brzine i smjera vjetra;
- sustava za akviziciju podataka.

Postavljena su dva multipiranometarska niza; jedan sastavljen od piranometara s termočlankom, a drugi od poluvodičkih piranometara. Poluvodički piranometri su manje precizni jer su osjetljivi na puno uži spektar upadnog zračenja, ali im je cijena višestruko manja od preciznijih piranometara s termočlankom. Namjera je rezultate dobivene iz oba multipiranometarska niza usporediti međusobno i s rezultatima mjerenja uobičajenim instrumentima (ukupno i raspršeno zračenje na horizontalnu plohu). Ukoliko se pokaže da su rezultati dobiveni multipiranometarskim nizom s poluvodičkim instrumentima dovoljno precizni, identični bi se sustavi mogli postaviti na više mjernih mjesta u Hrvatskoj. Kao referentni podaci za usporedbu korištene su izmjerene vrijednosti ukupnog i raspršenog zračenja na horizontalnu plohu. U tu se svrhu koriste vrlo precizni piranometri s termočlankom Kipp&Zonen CM 11, koji prema podjeli Svjetske meteorološke organizacije spadaju u najvišu klasu. Raspršeno zračenje mjeri se također pomoću

piranometra CM 11 koji je postavljen u središte kružnog prstena za zasjenjivanje. Prsten se postavlja tako da tijekom čitavog dana osjetno tijelo piranometra bude u sjeni. Redovito održavanje zahtijeva podešavanje prstena svaka dva dana, iako je u praksi uočeno da je period između podešavanja prstena uglavnom duži. S obzirom da prsten blokira i dio raspršenog zračenja, izmjerenu vrijednost potrebno je naknadno korigirati, a faktori korekcije dani su u tablici u uputstvu za rukovanje.

Posebna je pažnja usmjerena na odabir orijentacije pojedinog piranometra u multipiranometarskom nizu. To je pitanje posebno važno u slučaju dva ili tri instrumenta, kad se za određene orijentacije mogu dogoditi trenuci tijekom dana u kojima nije moguće pronaći rješenje sustava [16]. Primjenom četiri piranometra praktički je moguće proizvoljno ih orijentirati. Konfiguracija sustava odabrana je u skladu s karakteristikama mjernog mjesta. Naime, Faiman predlaže sljedeće orijentacije: jedan piranometar postavljen je pod kutom od  $90^\circ$  prema sjeveru, dva piranometra usmjerena na istok i zapad nagnuta su pod  $60^\circ$ , a piranometar usmjeren na jug pod kutom od  $30^\circ$  [16]. Međutim, sa sjeverne se strane mjernog mjesta nalaze se prozor i zid pa nije prihvatljivo jedan piranometar orijentirati izravno prema sjeveru. Stoga je prihvaćen prijedlog NREL-a [20] po kojem se instrumenti postavljaju tako da tijekom proljetnog i jesenskog ekvinocija na svaki od instrumenata u određenom trenutku tijekom dana Sunce upada okomito: na piranometar 1 u 6:00, na piranometar 2 u 10:00, na piranometar 3 u 14:00 te na piranometar 4 u 18:00 sati po sunčanom vremenu. U našem slučaju proračunati su kutovi nagiba i azimuta prikazani u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Orijehtacija piranometara u multipiranometarskom nizu

Piranometar br.	Azimut ( $\alpha$ )	Nagib prema horizontali ( $\beta$ )
1	$-90^\circ$	$90^\circ$
2	$-40^\circ$	$51^\circ$
3	$40^\circ$	$51^\circ$
4	$90^\circ$	$90^\circ$

Svaki od piranometara postavljen je na pocinčanu metalnu ploču koju je moguće pomicati oko dvije osi: gore-dolje i lijevo-desno. To omogućuje postavljanje piranometra u željeni smjer. Čitav sustav postavljen je na pocinčani metalni nosač i pričvršćen za podlogu. Usmjeravanje piranometara izvršeno je vrlo precizno uz pomoć stručnjaka iz Geodetskog zavoda Split. Nakon što su piranometri postavljeni u željeni položaj, izrađene su maske koje su postavljene da bi se spriječilo dopiranje reflektirane komponente do piranometara. Izrađene maske obojane su s unutrašnje strane crnom bojom da bi se što je

moguće više smanjila refleksija te su naknadno pričvršćene za ploče na kojima su smješteni piranometri. Piranometri 1 i 4 koji su usmjereni prema istoku, odnosno zapadu, zbog staklene površine sa sjeverne strane primali bi značajniji udio reflektiranog zračenja te su za njih maske oblikovane s posebnom pažnjom.

Multipiranometarski niz instrumenata s termočlankom sastoji se od dva precizna piranometra tipa Kipp&Zonen CM 11 (piranometri 2 i 3 u nizu) te dva piranometra Kipp&Zonen CM 6B koji su za klasu lošiji od CM 11, ali i dalje dovoljno precizni za ovu vrstu mjerenja (piranometri 1 i 4).

Svjetska meteorološka organizacija piranometre grupira u tri klase: drugi standard, prvi razred i drugi razred, prema tablici 4.2 [21].

Tablica 4.2. Kategorizacija piranometara prema Svjetskoj meteorološkoj organizaciji

Karakteristika	Drugi standard	Prva klasa	Druga klasa
Rezolucija (najmanja promjena ozračenja koju je moguće primjetiti, W/m <sup>2</sup> )	± 1	± 5	± 10
Stabilnost (godišnji postotak promjene po punoj skali)	± 1	± 2	± 5
Greška zbog nagiba (postotak odstupanja od idealnog pri visini Sunca od 10° za vedrog dana, godišnja promjena)	< ± 3	< ± 7	< ± 15
Greška zbog azimuta (postotak odstupanja od prosjeka pri visini Sunca od 10° za vedrog dana)	< ± 3	< ± 5	< ± 10
Temperaturni odziv (maksimalna postotna pogreška zbog promjene ambijentalne temperature)	± 1	± 2	± 5
Nelinearnost (postotak pune skale)	± 0,5	± 2	± 5
Spektralna osjetljivost (postotak odstupanja od prosječne apsorpcije spektra od 0,3 do 3 μm)	± 2	± 5	± 10
Vrijeme odziva (99% odziva)	< 25 s	< 1 min	< 4 min

Drugi multipiranometarski niz sastavljen je od poluvodičkih piranometara Kipp&Zonen SP Lite koji zbog svoje cijene i jednostavne upotrebe predstavljaju privlačno rješenje za mjerenja Sunčevog zračenja koja ne zahtijevaju vrhunsku preciznost.

U tablici 4.3. prikazani su tehnički podaci svih upotrijebljenih piranometara.

Tablica 4.3. Tehničke karakteristike piranometara [22], [23], [24]

Karakteristika	CM 11	CM 6B	SP Lite
Spektralni odziv	305-2800 nm (50% točaka) 335-2200 nm (95% točaka)	305-2800 nm (50% točaka)	400-1100 nm
Osjetljivost	4 – 6 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	9 – 15 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	100 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancija	700 – 1500 $\Omega$	70 – 100 $\Omega$	50 $\Omega$
Vrijeme odziva	< 15 s (95% odziva) < 24 s (99% odziva)	< 18 s (95% odziva)	< 1 s
Nelinearnost	< $\pm 0,6\%$ (< 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< $\pm 1,2\%$ (< 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< $\pm 1\%$ (< 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )
Temperaturna ovisnost osjetljivosti	< $\pm 1\%$ (-10°C do 40°C)	< $\pm 2\%$ (-10°C do 40°C)	< $\pm 0,15\%$ (-10°C do 40°C)
Pogreška zbog usmjerenosti	< $\pm 10 \text{ W}/\text{m}^2$ (uz upadno zračenje 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< $\pm 20 \text{ W}/\text{m}^2$ (uz upadno zračenje 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\leq 10\%$ greška zbog azimuta (pri upadnom kutu od 60°)
Pogreška zbog nagiba	< $\pm 0,25\%$ (uz upadno zračenje 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	< $\pm 1\%$ (uz upadno zračenje 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\leq 10\%$ greška zbog nagiba (unutar upadnog kuta od 80°)
Pomak nule zbog termalnog zračenja	< 7 $\text{W}/\text{m}^2$ pri 200 $\text{W}/\text{m}^2$ termalnog zračenja	< 15 $\text{W}/\text{m}^2$ pri 200 $\text{W}/\text{m}^2$ termalnog zračenja	
Pomak nule zbog temperaturnih promjena	< 2 $\text{W}/\text{m}^2$ pri promjeni temperature od 5 K/h	< 4 $\text{W}/\text{m}^2$ pri promjeni temperature od 5 K/h	
Radna temperatura	-40°C do +80°C	-40°C do +80°C	-30°C do +70°C
Kut gledanja (sr)	$2\pi$	$2\pi$	$2\pi$
Ozračenje	0 – 1400 $\text{W}/\text{m}^2$ (max. 4000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	0 – 1400 $\text{W}/\text{m}^2$ (max. 2000 $\text{W}/\text{m}^2$ )	max. 2000 $\text{W}/\text{m}^2$
Nestabilnost	< $\pm 0,5\%$ promjene osjetljivosti po godini	< $\pm 1\%$ promjene osjetljivosti po godini	

Preciznost piranometara ovisi o nizu parametara kao što su temperatura, ozračenje, kut upada. Očekivana pogreška za piranometre drugog standarda, u koje spada i CM 11 je 3% za satne, odnosno 2% za dnevne vrijednosti, dok je očekivana dnevna pogreška za CM 6B 5%.

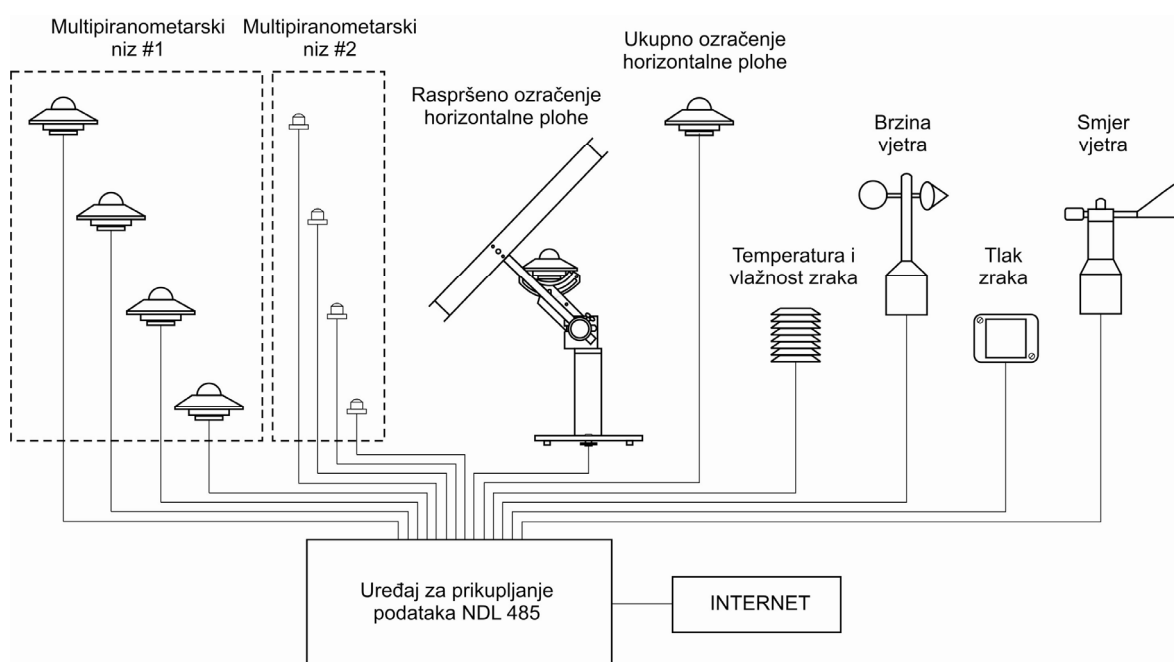
Uz osjetnike za mjerenje Sunčeva zračenja, sustav sadrži i u meteorološkoj praksi uobičajene instrumente za mjerenje temperature i vlažnosti zraka, kao i za mjerenje brzine i smjera vjetra.

Popis svih mjernih instrumenata spojenih na sustav za prikupljanje podataka predložen je u Tablici 4.4.

Tablica 4.4. Popis uređaja u sustavu za mjerenje Sunčevog zračenja na FESB-u

Naziv	Namjena	Broj instrumenata
Kipp&Zonen CM 11	Mjerenje ukupnog Sunčevog zračenja	4
Kipp&Zonen CM 6B	Mjerenje ukupnog Sunčevog zračenja	2
Kipp&Zonen CM 121B	Prsten za zasjenjivanje	1
Wilmers Messtechnik 0533	Mjerenje temperature i vlage	1
Thies Klima	Mjerenje brzine vjetra	1
Wilmers 0315	Mjerenje smjera vjetra	1
Vaisala PTB 100A	Mjerenje tlaka zraka	1

Svi instrumenti spojeni su na sustav za prikupljanje podataka Wilmers NDL 485. Mjerenja se vrše svakih deset sekundi te se podaci zapisuju u datoteku koja se sprema u memoriji. Svaka datoteka sadrži podatke o mjerjenjima jednog punog sata. Uz to, sustav tijekom dana stvara i obično jednu ili dvije datoteke koje sadrže usrednjene vrijednosti za svakih deset minuta. Zbog ograničene memorije sustava za prikupljanje podataka, datoteke je potrebno svakih nekoliko dana prebaciti na osobno računalo kako bi se stvorio prostor za zapisivanje novih datoteka. Sustav je spojen na računalnu mrežu fakulteta pa je moguće jednostavno prebacivanje datoteka na osobno računalo kao i pristup sustavu preko preglednika interneta. Shema sustava prikazana je na slici 4.6.



Slika 4.6. Shema sustava za mjerenje komponenata Sunčevog zračenja na FESB-u

#### 4.5. Rezultati mjerenja Sunčevog zračenja na FESB-u

Za sve praktične primjene u kojima se koristi energija Sunčeva zračenja od neprocjenjive su važnosti podaci dobiveni mjerjenjima upravo na mjestu primjene. Njihovo poznavanje nužno je za procjenu potrebne investicije koja značajno ovisi o potencijalu Sunčeve energije. Osim ukupnog iznosa Sunčevog zračenja potrebno je poznavati i udio svake pojedine komponente, vremensku ovisnost Sunčeva zračenja, a za neke primjene nužno je i poznavanje spektralne razdiobe.

Međutim, u praksi su ti podaci rijetko dostupni, a činjenica da je pouzdane rezultate moguće dobiti tek višegodišnjim mjerenjima dodatno otežava posao projektantima sustava za korištenje Sunčeve energije.

Cilj je mjernog sustava na FESB-u uspostaviti pouzdana mjerenja koja će biti temelj za ispravnu procjenu potencijala Sunčeve energije na splitskom području. Sustav je započeo s radom u travnju 2005. godine pa će u ovom radu biti predloženi rezultati prvih 5 mjeseci mjerenja.

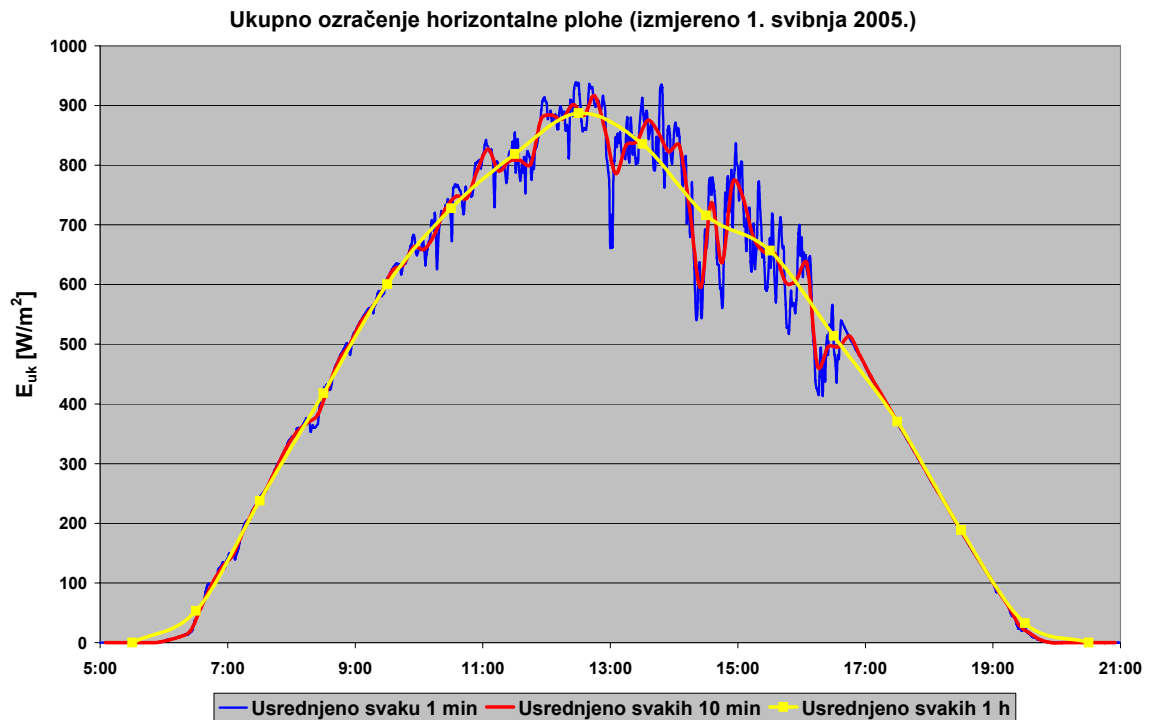
Potrebno je napomenuti da su svi predloženi rezultati mjerenja prikazani u mjesnom vremenu.

#### **4.5.1. Vremenski prikaz izmjerenih podataka**

Pouzdanost mjerenih podataka o Sunčevom zračenju raste što je period prikupljanja podataka duži, a broj podataka veći. S velikim brojem prikupljenih podataka postavlja se pitanje vremenske baze u kojoj bi se ti podaci prikazali. Uobičajeno je podatke o Sunčevu zračenju prikazati u obliku satnih ili dnevnih suma, premda je u posljednje vrijeme sve veći broj mjernih postaja koje Sunčevo zračenje prikazuju i preciznije.

U sustavu za mjerenje Sunčeva zračenja postavljenom na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje svi podaci mjere se svakih 10 sekundi te se zapisuju u datoteke. Svaka datoteka sadrži podatke za period od sat vremena. Osim toga, u dodatnu se datoteku zapisuje srednja vrijednost svih mjerenih podataka svakih 10 minuta. U ovom radu je kao osnovni odabran vremenski period od 1 minute te su svi podaci prikupljeni svakih 10 sekundi usrednjeni na odgovarajući način. Pritom treba voditi računa da se usrednjavanjem djelomično ili u potpunosti gubi ponekad vrlo korisna informacija o karakteristikama Sunčeva zračenja u promatranom vremenskom periodu.

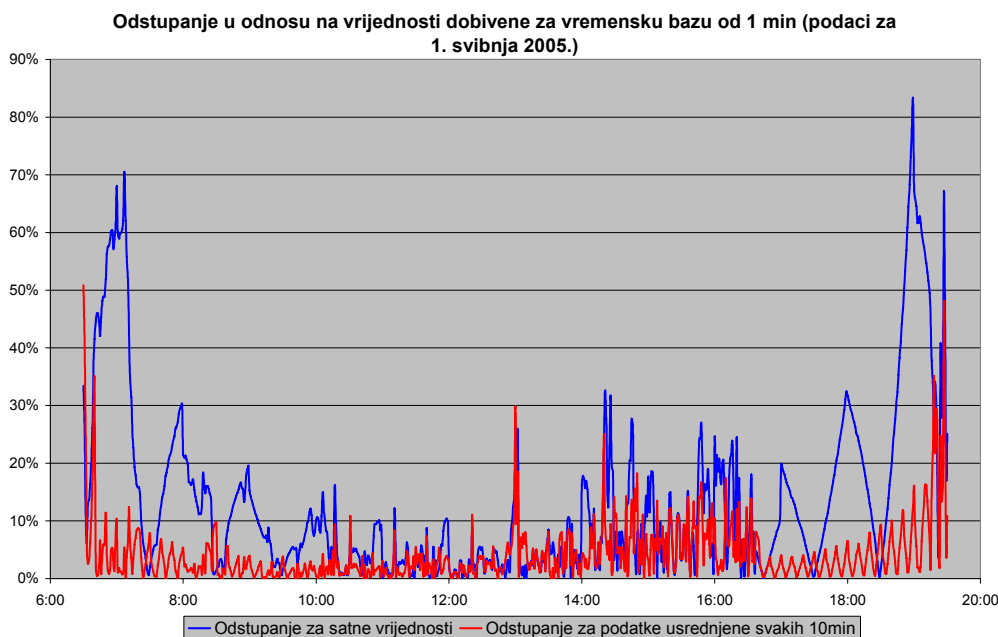
Radi utvrđivanja greške koja se radi usrednjavanjem izvršeno je ispitivanje za tri vremenska perioda: 1 sat, 10 minuta i 1 minutu. Proizvoljno je odabran dan 1. svibnja 2005. te su ispitivane vrijednosti ukupnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu. Podaci su prikazani na slici 4.7.



*Slika 4.7. Usporedba ukupnog ozračenja horizontalne plohe za tri različite vremenske baze: 1 min, 10 min i 1 h*

Iz karakteristike ozračenja vidljivo je da je riječ o danu koji je bio vedar tijekom jutarnjih i popodnevni sati (od izlaska Sunca do 10 sati ujutro, odnosno od 17 sati poslijepodne do zalaska Sunca), dok je u sredini dana bilo oblaka koji su uzrokovali stalne promjene ozračenja. I dok je na karakteristici dobivenoj za period od 10 min moguće primjetiti promjene koje su bile nešto dugotrajnije, na karakteristici za 1 h one se uopće ne opažaju. Na toj se karakteristici čini kao da su promjene u ozračenja tijekom čitavog dana kontinuirane, što je ispunjeno samo onda kad je nebo vedro i u tim se periodima dana sve tri karakteristike vrlo dobro slažu.

Ukoliko se period od 1 min uzme kao referentan, moguće je odrediti odstupanje za preostale dvije karakteristike, slika 4.8.



*Slika 4.8. Relativna pogreška ozračenja horizontalne plohe za slučaj vremenske baze 1 h i 10 min u odnosu na ozračenje horizontalne plohe kad je baza 1 min*

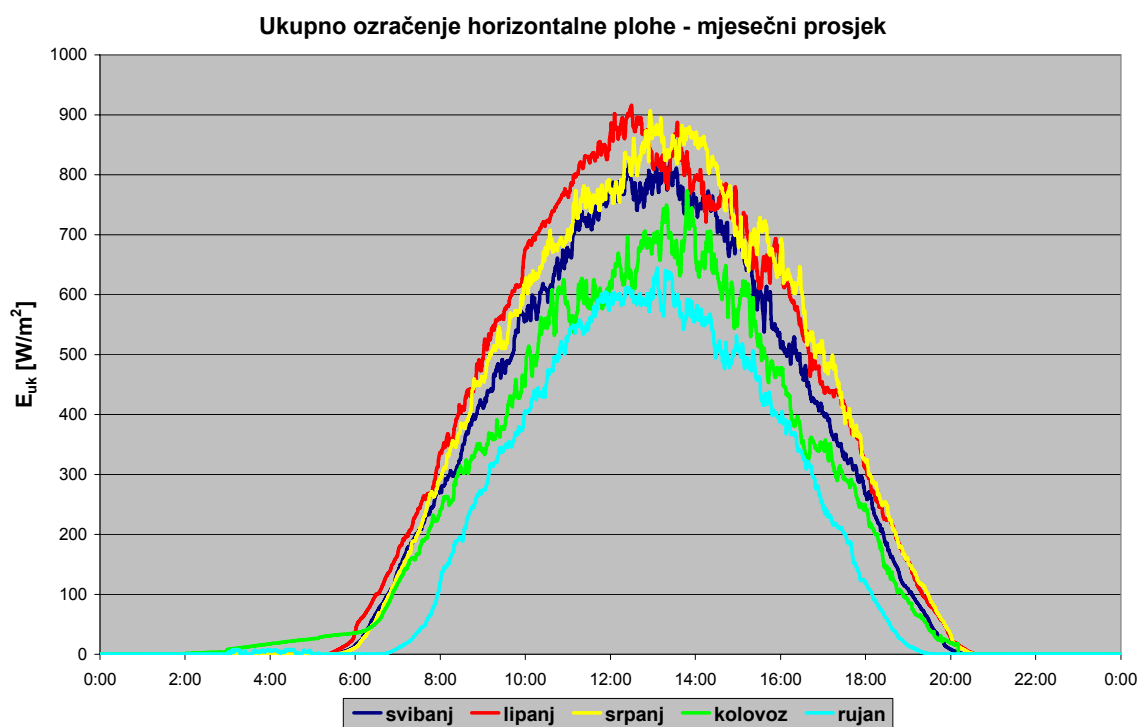
Odstupanje od podataka dobivenih za slučaj vremenske baze od 1 min veće je početkom i krajem dana. Tada su vrijednosti ozračenja puno manje, a njihove relativne promjene značajnije pa usrednjavanje vodi do najvećih odstupanja upravo u tim dijelovima dana. Najveća su odstupanja upravo početkom i krajem dana, kad ozračenje raste s nule, odnosno opada na nulu. Jasno je da se s odabirom veće vremenske baze povećava i odstupanje od pravih vrijednosti zračenja. Ako se odaberu satne vrijednosti, tada se uzima da je zračenje konstantno u čitavom intervalu od 1 h pa svaka promjena zračenja unutar promatranog intervala povećava pogrešku koja u konačnici može biti znatna. Za promatrani dan uočeno je da tijekom dana pogreška u nekoliko navrata dosegne vrijednost od 30 %. Već odabirom vremenske baze od 10 min postiže se puno bolje slaganje, a greška tijekom dana uglavnom je ispod 10 %. Greška prelazi 10 % u popodnevnim satima, kad se zračenje najviše mijenja, a u dva navrata prelazi i 20%.

Prilikom usrednjavanja potrebno je voditi računa da veća vremenska baza koja vodi do manjeg broja podataka i samim tim do jednostavnijeg proračuna, istovremeno smanjuje mogućnost opisivanja stvarnog ponašanja Sunčevog zračenja. Ipak, za primjene u fotonaponskim sustavima od brzih promjena zračenja važnije je poznavati ozračenost plohe, odnosno dostupnu energiju Sunčeva zračenja.



#### 4.5.2. Mjerenje Sunčeva zračenja na horizontalnu plohu

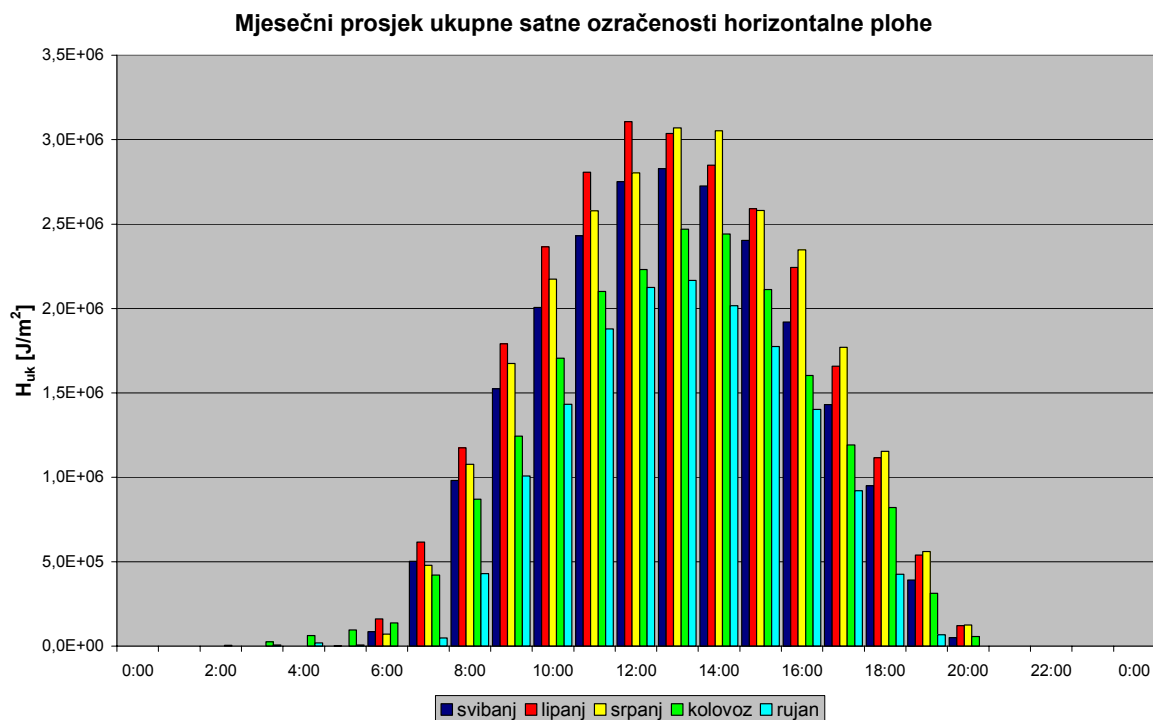
Ukupno Sunčevo zračenje koje upada na horizontalnu plohu je podatak koji se najčešće susreće u meteorološkoj praksi i koji predstavlja osnovni parametar u većini modela za proračun Sunčeva zračenja. Uobičajeno se podaci prezentiraju u obliku mjesečnog prosjeka dnevnog ili satnog ozračenja. Mjerenje se vrši pomoću piranometra postavljenog u horizontalni položaj. Na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje ukupno se Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu mjeri vrlo preciznim piranometrom Kipp&Zonen CM 11. Na slici 4.9. prikazane su mjesečne prosječne vrijednosti ukupnog ozračenja horizontalne plohe izmjerena u periodu od svibnja do rujna 2005. godine na FESB-u.



Slika 4.9. Mjesečni prosjek ukupnog ozračenja horizontalne plohe u Splitu za razdoblje od svibnja do rujna 2005.

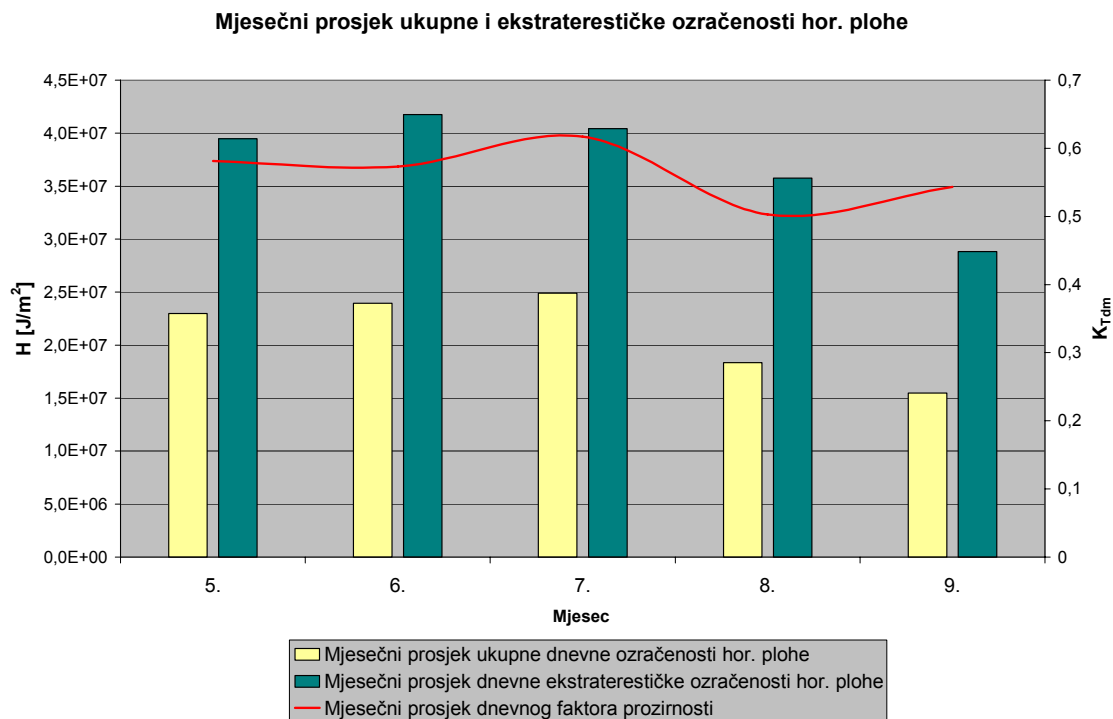
Najveća vrijednost ozračenja horizontalne plohe u Splitu izmjerena je za lipanj i srpanj. Međutim, karakteristike Sunčeva zračenja na promatranom mjestu moguće je procijeniti jedino iz podataka prikupljenih kroz dugi niz godina. Tek se na taj način projektantima sustava za korištenje Sunčeve energije omogućuje prilično pouzdana procjena potencijala Sunčeva zračenja. Međutim, ukoliko se želi izvršiti ispitivanje rada fotonaponskog sustava u realnim uvjetima, potrebno je poznavati iznos i karakteristike

Sunčeva zračenja u trenutku ispitivanja. Za praktične je primjene korisno poznavati iznos Sunčeve energije koja je dostupna na određenom mjestu u nekom vremenskom periodu. Ukupna Sunčeva energija koja upada na horizontalnu plohu naziva se ozračenost plohe i predstavljena je površinom ispod krivulje ozračenja pa se može izračunati integriranjem. Najčešće se prikazuju satne i dnevne vrijednosti ozračenosti. Mjesečni prosjek ukupne satne ozračenosti horizontalne plohe prikazan je na slici 4.10.



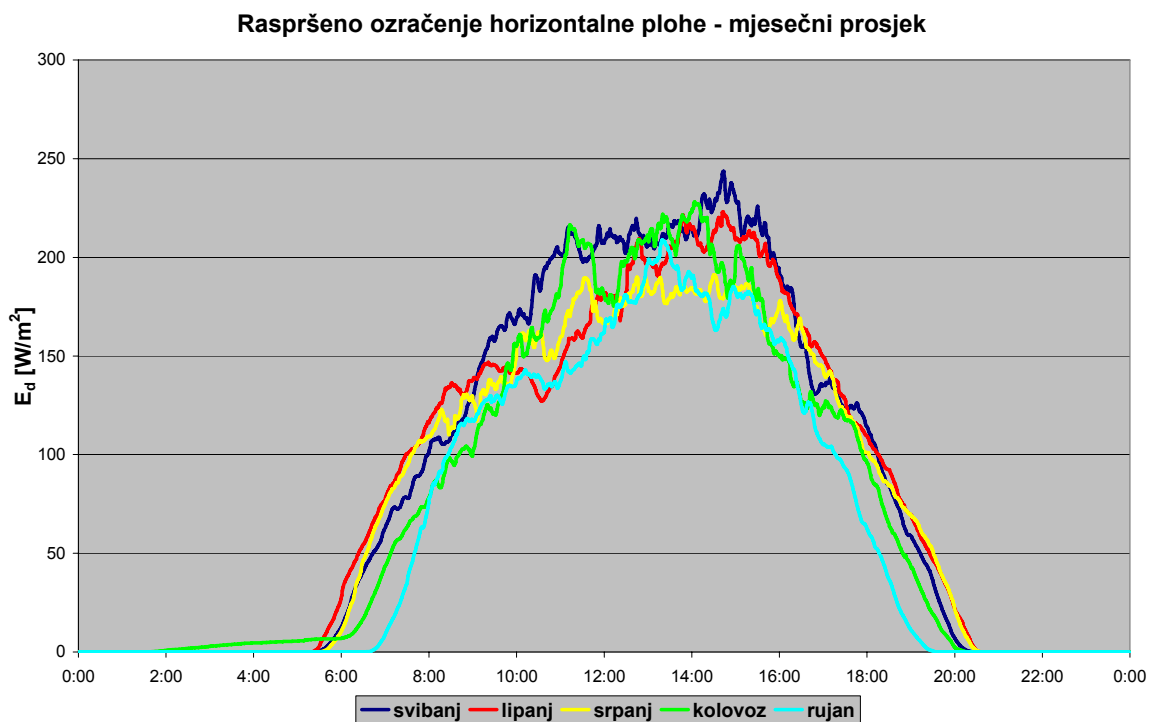
Slika 4.10. Mjesečni prosjek ukupne satne ozračenosti horizontalne plohe

Na slici 4.11. prikazane su mjesečne srednje vrijednosti dnevne ozračenosti horizontalne plohe te dnevne ekstraterestičke ozračenosti. Iz ta dva podatka može se proračunati mjesečni faktor prozirnosti  $K_{Tdm}$  pomoću (3.33) pa je moguće odrediti mjesečni prosjek dnevne raspršene ozračenosti horizontalne plohe  $H_{dm}$  koristeći izraz (3.34). Isto tako, koristeći dnevne vrijednosti faktora prozirnosti  $K_{Td}$  iz (3.35) i (3.36) se može izračunati dnevna raspršena ozračenost horizontalne plohe.



Slika 4.11. Usporedba ukupne mjesečne prizemne i ekstraterestičke ozračenosti horizontalne plohe te faktor prozirnosti

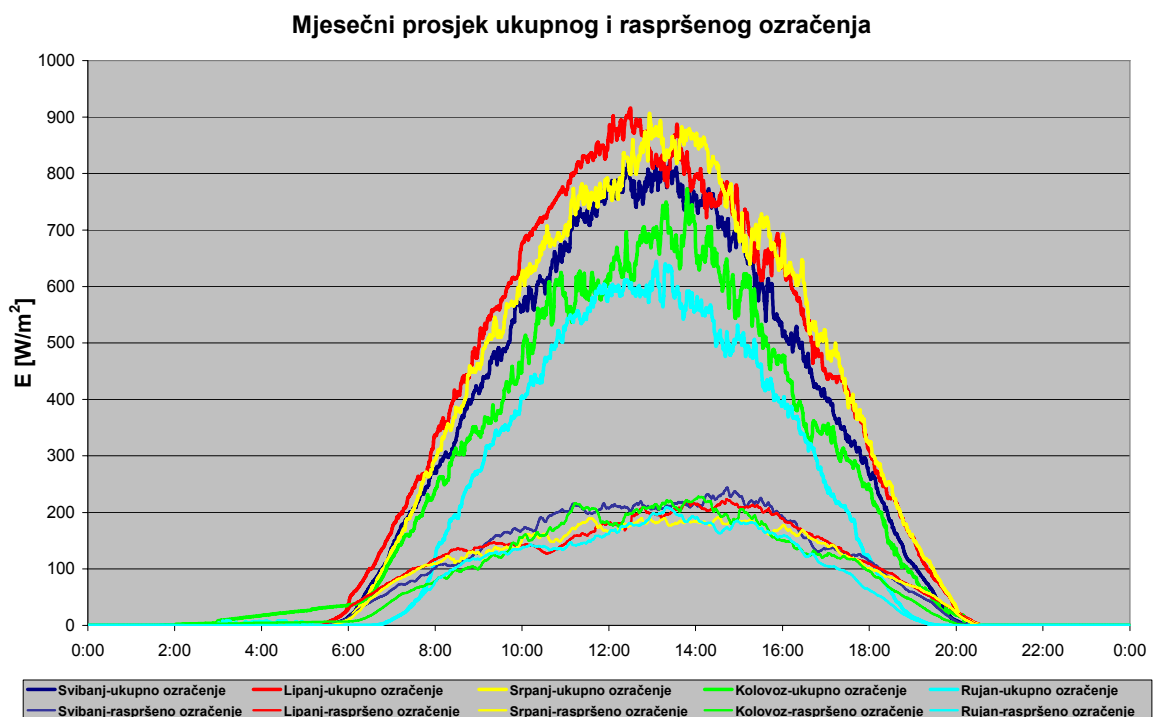
Izmjerene vrijednosti ozračenja horizontalne plohe raspršenim Sunčevim zračenjem prikazane su na slici 4.12.



Slika 4.12. Mjesečni prosjek raspršene ozračenosti horizontalne plohe

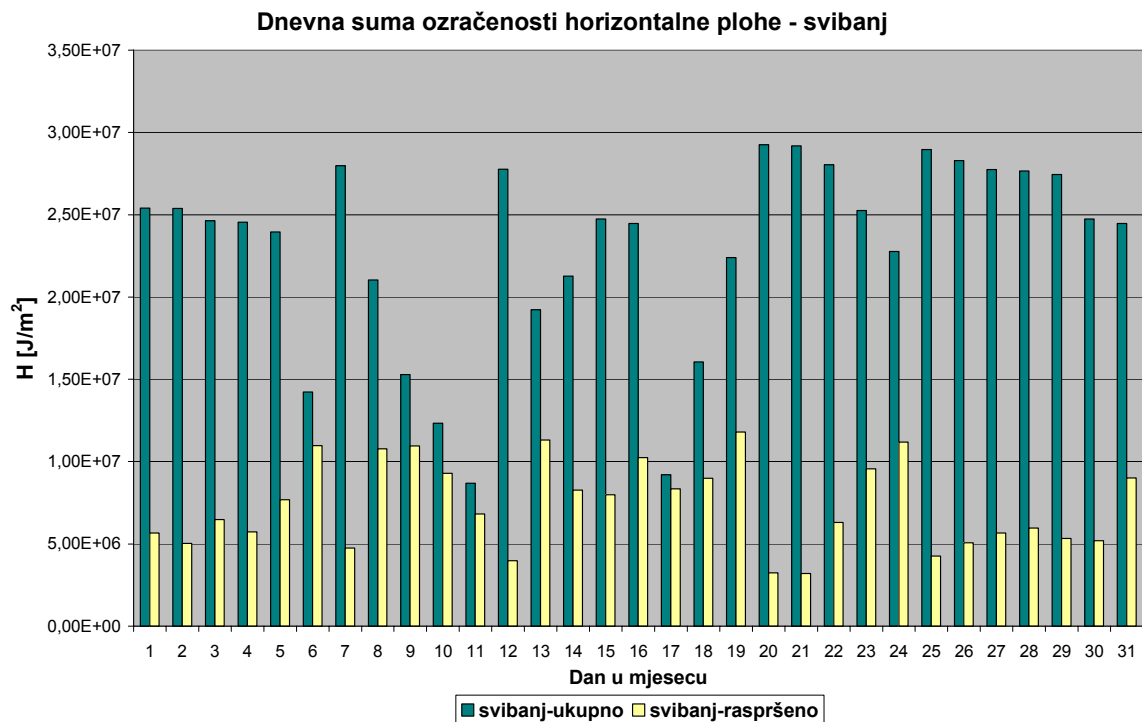
Za razliku od ukupnog ozračenja horizontalne plohe, izmjerene vrijednosti raspršenog ozračenja ne razlikuju se previše po iznosu i ponašanje im je vrlo slično za svih 5 mjeseci.

Najveću vrijednost postižu u vremenskom intervalu od nekoliko sati prije i poslije sunčanog podneva, kad je i ukupno zračenje najveće. U prosjeku raspršeno zračenje ne postiže tijekom dana iznose veće od  $250 \text{ W/m}^2$ . Na slici 4.13. zajedno su prikazani mjesečni prosjeci ukupnog i raspršenog ozračenja horizontalne plohe.

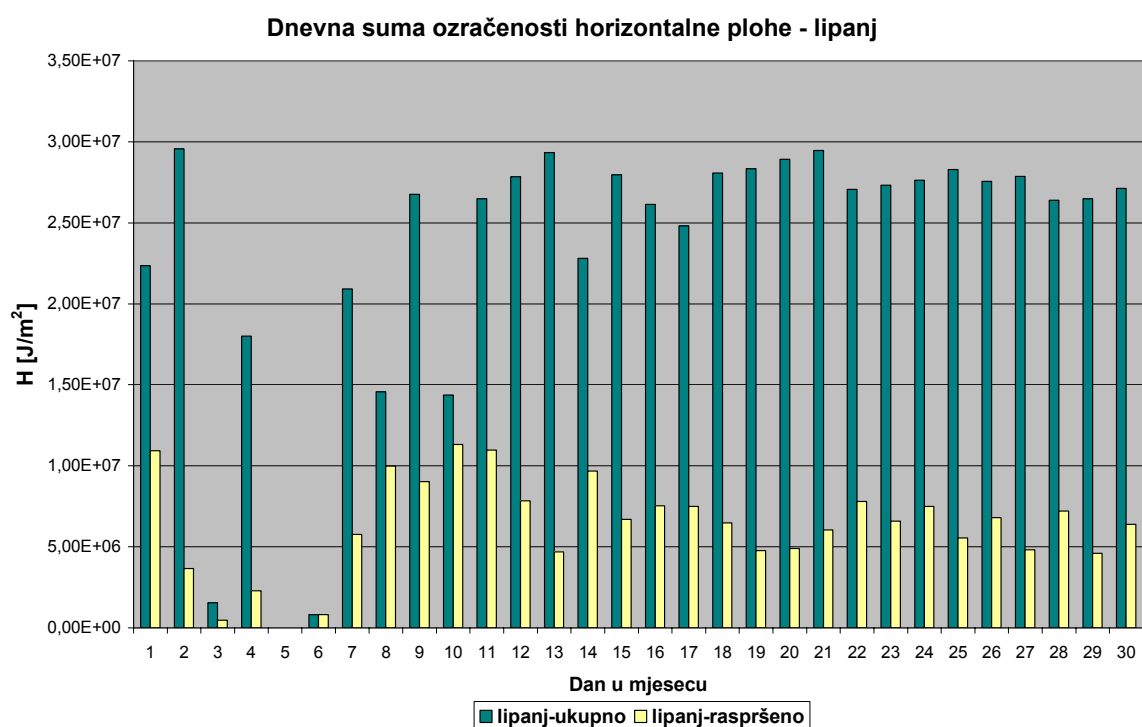


*Slika 4.13. Ukupno i raspršeno ozračenje horizontalne plohe*

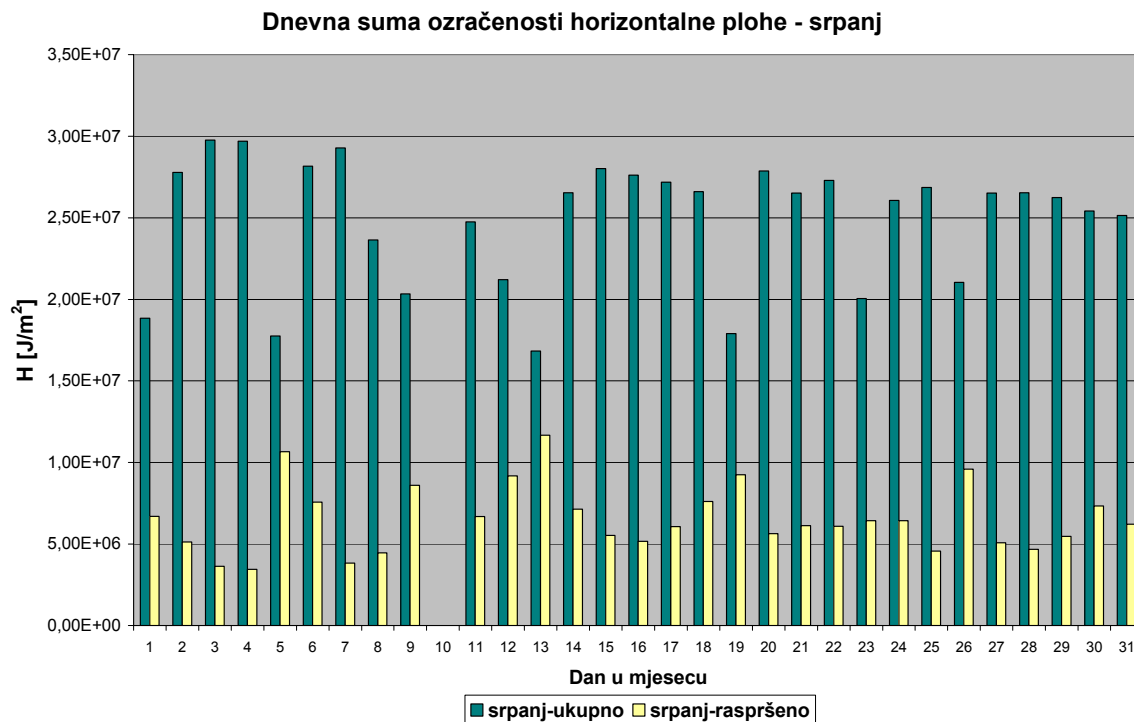
Često je korisno znati koliku energija Sunčevog zračenja primi horizontalna ploha tijekom jednog dana. Dnevne sume ozračenosti prikazane su za svih 5 mjeseci na slikama 4.14. – 4.18.



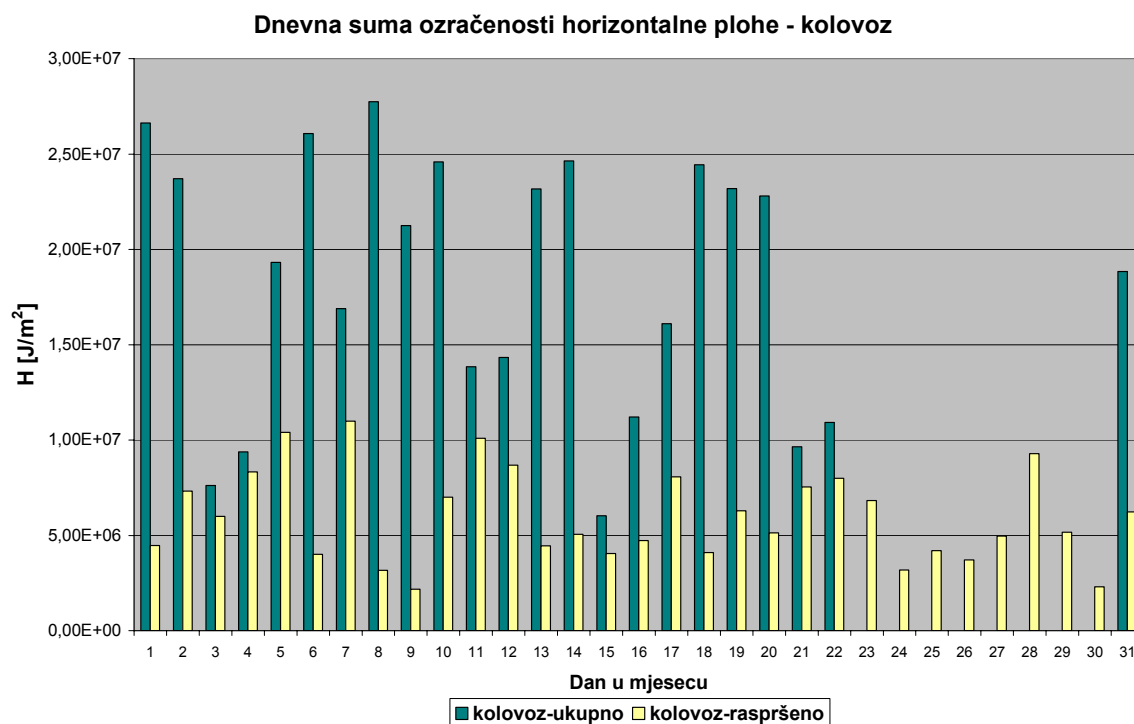
Slika 4.14. Dnevna ukupna i raspršena ozračenost horizontalne plohe-svibanj 2005.



Slika 4.15. Dnevna ukupna i raspršena ozračenost horizontalne plohe-lipanj 2005.

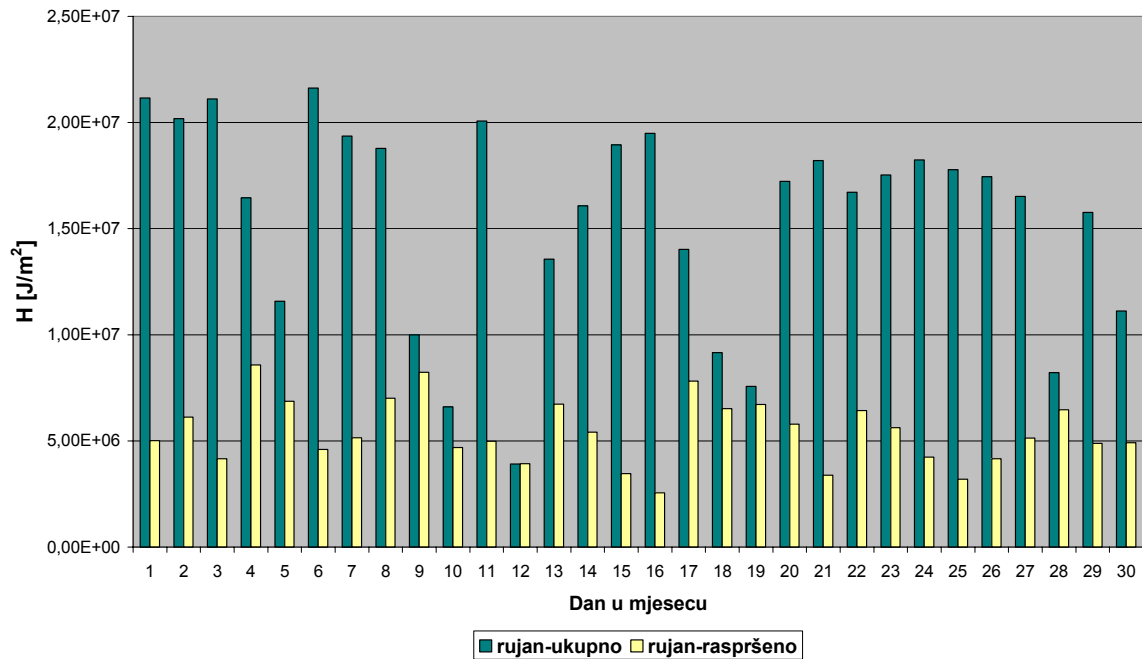


Slika 4.16. Dnevna ukupna i raspršena ozračenost horizontalne plohe-srpanj 2005.



Slika 4.17. Dnevna ukupna i raspršena ozračenost horizontalne plohe-kolovoz 2005.

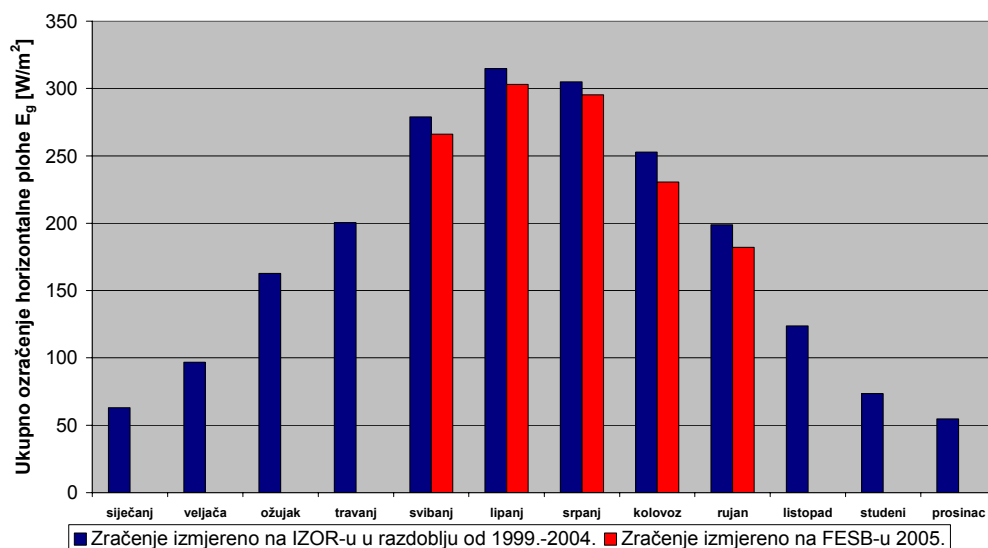
Dnevna suma ozračenosti horizontalne plohe - rujan



Slika 4.18. Dnevna ukupna i raspršena ozračenost horizontalne plohe-svibanj 2005.

Vrijednosti Sunčeva zračenja izmjerene na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu uspoređene su s mjerenjima koja su vršena od strane Instituta za oceanografiju i ribarstvo u Splitu u 5-godišnjem razdoblju (1999.-2004.), a čiji su podaci dostupni na internetu [25]. Usporedba je izvršena za mjesečne prosječne vrijednosti ukupnog ozračenja horizontalne plohe te je prikazana na slici 4.19.

Usporedba zračenja izmjenog na FESB-u i na IZOR-u\*



\* Podaci preuzeti s www.izor.hr

Slika 4.19. Usporedba vrijednosti Sunčeva zračenja izmjenog na FESB-u i na IZOR-u

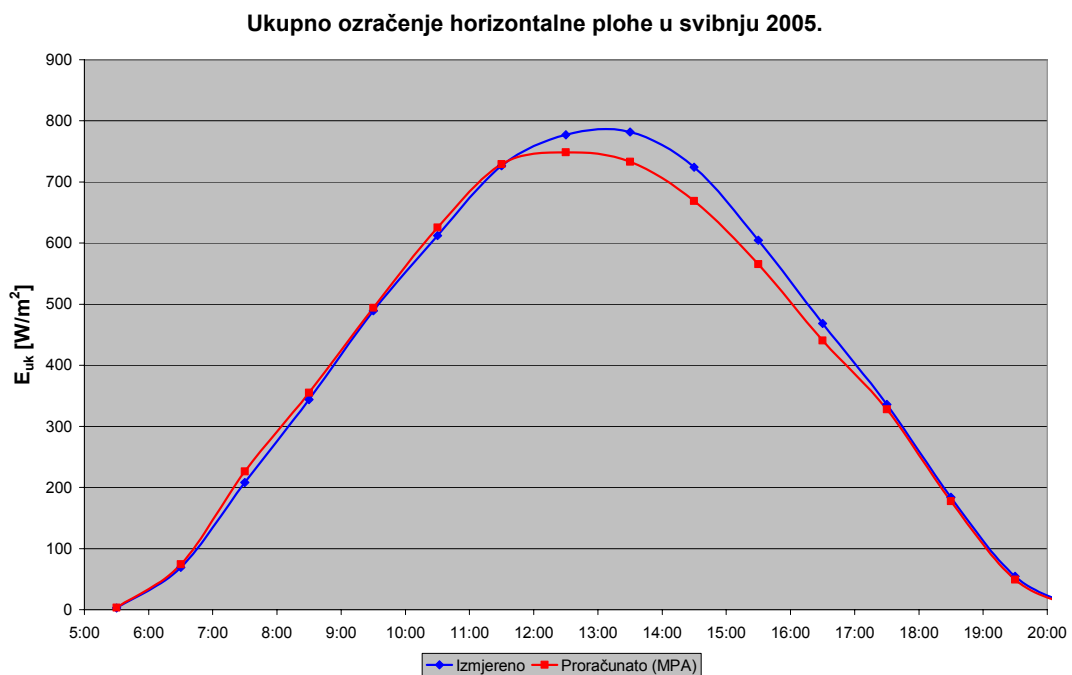
Iako se preciznija procjena Sunčeva zračenja može donijeti tek na temelju dugogodišnjih mjerenja, izvršena usporedba potvrđuje vjerodostojnost podataka dobivenih mjerenjem na FESB-u. Naime, za sve uspoređene mjesece (od svibnja do rujna) odstupanje je manje od 10 %. Određena razlika u zabilježenom mjerenju moguća je i zbog različitih položaja mjernih postaja, odnosno različitih utjecaja reflektiranog zračenja.

#### 4.5.3. Rezultati mjerenja Sunčeva zračenja metodom multipiranometarskog niza

Princip na kojem se zasniva određivanje komponenata Sunčeva zračenja mjerenjem uz pomoć tzv. multipiranometarskog niza već je iznesen u poglavlju 4.3., dok je u poglavlju 4.4. opisan mjerni sustav postavljen na FESB-u.

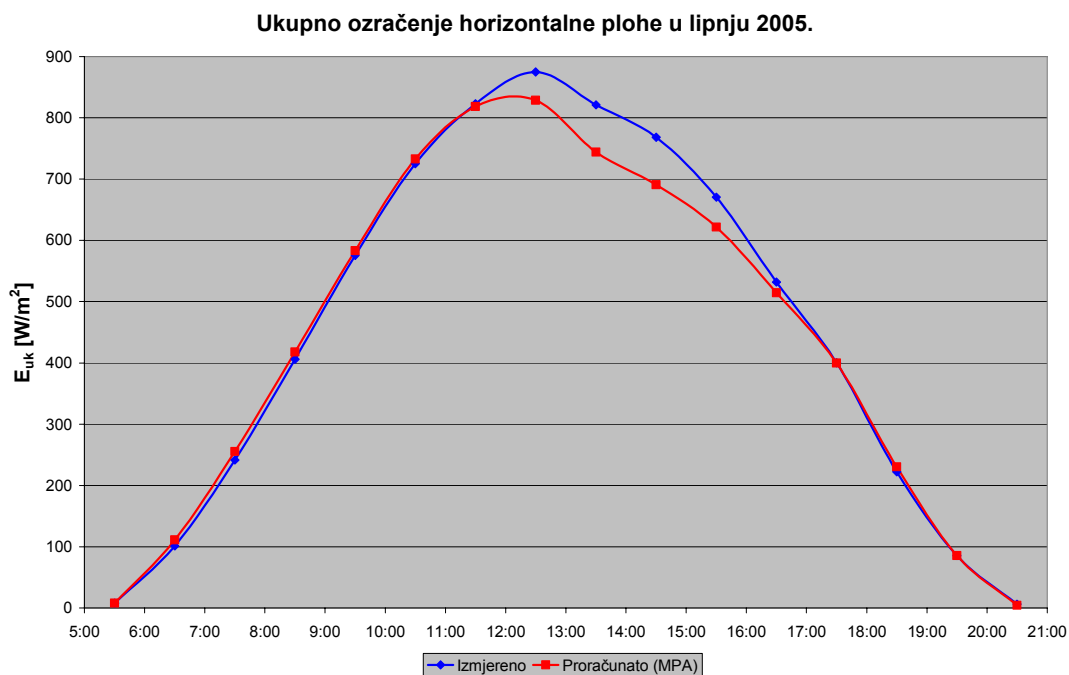
Metodom multipiranometarskog niza određeno je ukupno ozračenje horizontalne plohe za svibanj, lipanj i srpanj 2005. godine i te su vrijednosti uspoređene s vrijednostima dobivenima mjerenjem referentnim piranometrom Kipp&Zonen CM 11. Pri određivanju komponenata multipiranometarskim nizom pretpostavljena je izotropnost neba, odnosno primijenjene su relacije (4.3) i (4.4). Proračun je izvršen za srednje satne vrijednosti zračenja te je za svaki sat i za svaki dan izračunato srednje kvadratno odstupanje ukupnog ozračenja horizontalne plohe od izmjerene vrijednosti, Tablica 4.5.

Dobivene vrijednosti prikazane su usporedo s izmjerjenima na slikama 4.20. – 4.22.

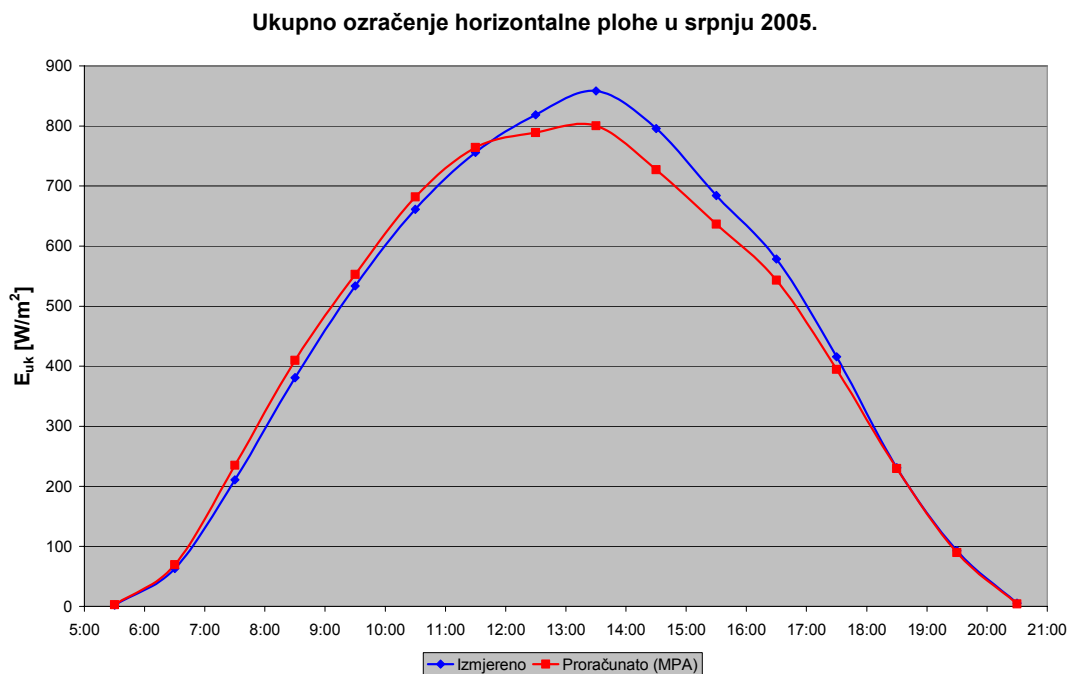


Slika 4.20. Ukupno ozračenje horizontalne plohe u svibnju 2005.





*Slika 4.21. Ukupno ozračenje horizontalne plohe u lipnju 2005.*



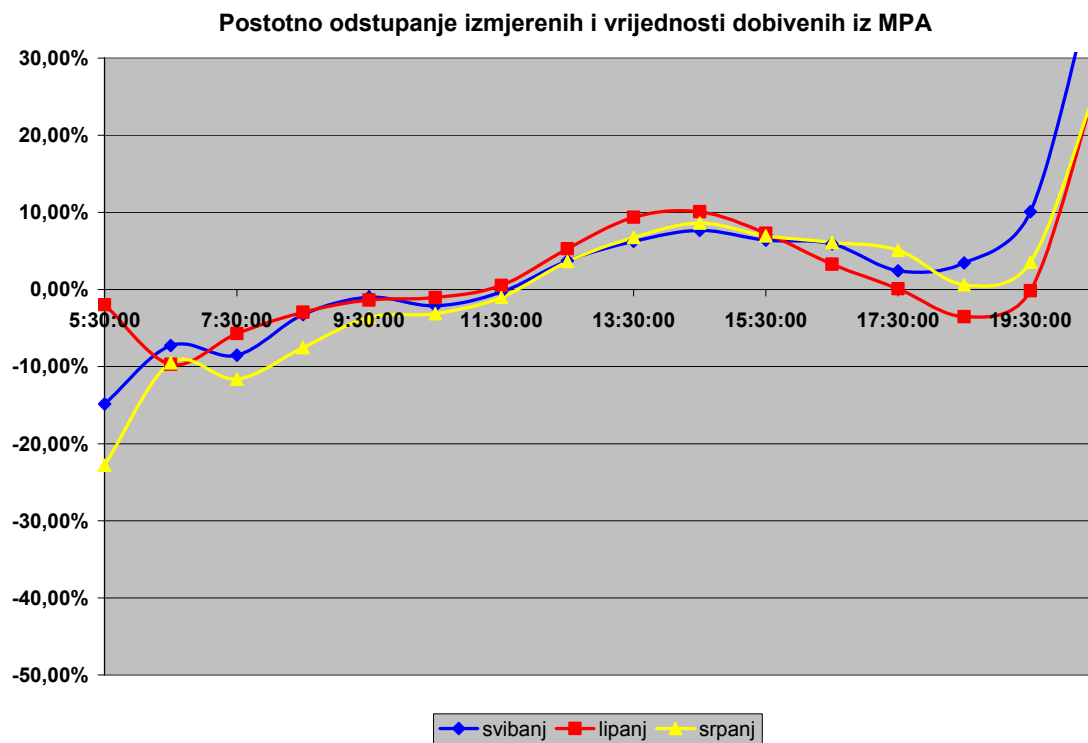
*Slika 4.22. Ukupno ozračenje horizontalne plohe u srpnju 2005.*

Tablica 4.5. Dnevni i mjesečni prosjeci srednjeg kvadratnog odstupanja ukupnog ozračenja horizontalne plohe

Dan	Srednje kvadratno odstupanje ozračenja horizontalne plohe [ $W/m^2$ ]		
	svibanj	lipanj	srpanj
1.	26,48	25,52	27,78
2.	25,57	33,28	36,02
3.	26,71		42,81
4.	28,93		37,32
5.	27,62		31,07
6.	25,52		34,35
7.	39,63	39,43	40,44
8.	34,75	28,20	37,93
9.	21,64	33,98	29,07
10.	22,70	28,49	
11.	20,79	38,23	39,89
12.	30,33	26,36	34,95
13.	24,19	31,71	32,74
14.	23,97	31,83	30,79
15.	26,32	27,39	40,05
16.	24,44	36,05	34,82
17.	23,27	22,82	32,46
18.	34,59	33,38	33,72
19.	20,81	37,00	29,11
20.	37,27	41,16	36,73
21.	36,33	35,51	33,35
22.	30,96	29,21	38,65
23.	24,86	29,32	40,42
24.	28,55	32,03	35,33
25.	36,67	33,42	34,50
26.	35,40	37,06	25,32
27.	31,51	40,59	33,73
28.	26,75	39,25	32,99
29.	30,17	42,82	60,62
30.	26,35	37,33	30,24
31.	29,38		37,58
<b>prosječno</b>	<b>28,47</b>	<b>33,52</b>	<b>35,49</b>

Iz slika 4.20-4.22. vidljivo je da se vrijednosti ukupnog ozračenja horizontalne plohe proračunate metodom multipiranometarskog niza vrlo dobro slažu s izmjerenim vrijednostima. Najveća se odstupanja opažaju u poslijepodnevnim satima i za promatrana tri mjeseca najveće opaženo odstupanje iznosi  $77,5 W/m^2$ . Spomenuta odstupanja moguća su posljedica utjecaja reflektirane komponente kao i pretpostavke izotropnosti neba koja je korištena pri proračunu. Promatrajući postotna odstupanja izmjerenih i proračunatih vrijednosti, opaža se da su ona najveća tijekom zore i sumraka, kad je ozračenje

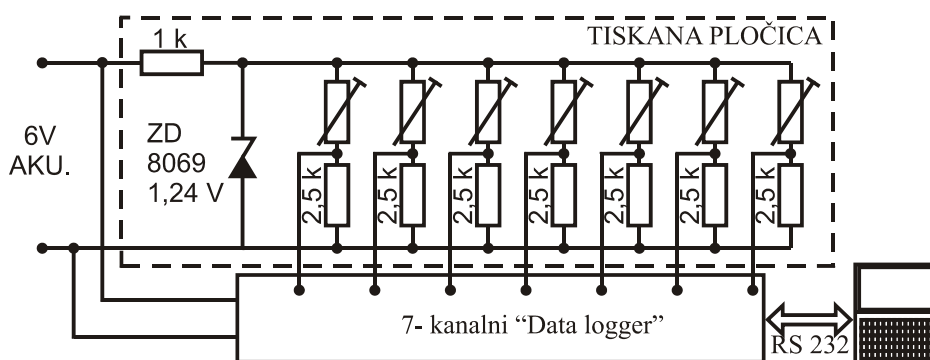
horizontalne plohe jako malog iznosa pa je i utjecaj te pogreške zanemariv. Postotna odstupanja između izmjerenih i proračunatih vrijednosti za sva tri mjeseca prikazana su na slici 4.23. na kojoj je vidljivo da se tijekom čitavog dana, uz iznimku razdoblja malo nakon izlaska i prije zalaska Sunca, postotno odstupanje zadržava unutar granica od  $\pm 10\%$ . Srednja kvadratna pogreška za pojedini dan kreće se u prosjeku u granicama od oko 30-35  $W/m^2$ .



Slika 4.23. Postotno odstupanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti ozračenja horizontalne plohe

## 5. Sustav za mjerenje temperature i akviziciju podataka

Uz Sunčevo zračenje, drugi važan parametar koji određuje karakteristike rada fotonaponskog modula je temperatura. Za mjerenje temperature iskorišten je sustav za mjerenje temperatura i prikupljanje podataka koji je izrađen je na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje za potrebe projekta "Mjerenje temperaturnog polja u okolišu modela opterećenog vn kabela u kabelskom tunelu" HE "Zakučac" [26]. Sustav čine termistorski osjetnici postavljeni u 7 paralelnih kanala, sklop za prikupljanje i obradu podataka te baterije. Shema sustava prikazana je na slici 5.1.



Slika 5.1. Shema 7-kanalnog sustava za mjerenje temperature

Sustav ima i vlastitu EEPROM memoriju čiji je kapacitet dovoljan za pohranu podataka prikupljenih tijekom tjedan dana. Spajanje s osobnim računalom omogućeno je serijskim sučeljem preko RS-232 priključka.

Zbog svoje stabilnosti i pouzdanosti za osjetnike su odabrani termistori oznake EC95F103 koji imaju dobru ujednačenost R-t karakteristika te omogućuju snimanje velikog broja mjernih podataka uz odgovarajuću brzinu odziva. Najvažnije karakteristike upotrijebljenih termistora navedene su u Tablici 5.1.

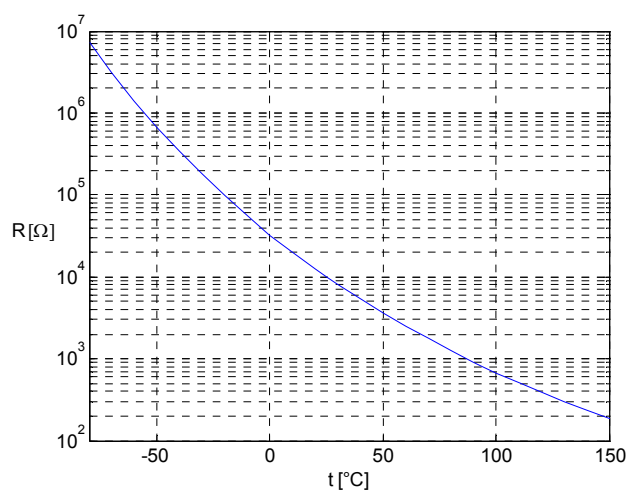
Tablica 5.1. Najvažnije karakteristike termistora EC95F103 [26]

Ujednačenost odziva	Bolja od $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	
Maksimalni promjer	2,4 mm	
Temperaturno područje	$-80^{\circ}\text{C} - +150^{\circ}\text{C}$	
Konstanta samozagrijavanja	u zraku: $1 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$	u ulju: $8 \text{ mW}/^{\circ}\text{C}$
Vremenska konstanta	u zraku: 10 s	u ulju: 1 s
Zaštita	Epoksidna smola	

U Tablici 5.2. prikazan je otpor termistora u ovisnosti o temperaturi, a R-t karakteristika prikazana je na slici 5.2.

Tablica 5.2. Otpor termistora EC95F103 u ovisnosti o temperaturi

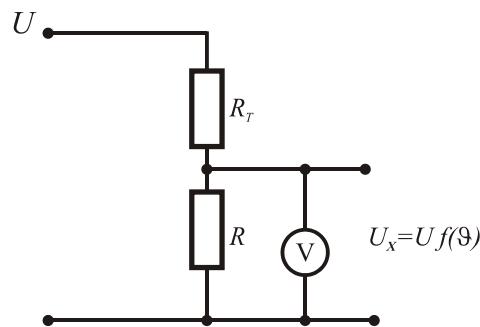
$^{\circ}\text{C}$	R [ $\Omega$ ]	$^{\circ}\text{C}$	R [ $\Omega$ ]	$^{\circ}\text{C}$	R [ $\Omega$ ]
-80	7368000	10	19900	90	915,30
-70	3117500	20	12490	100	678,30
-60	1404900	25	10000	110	510,30
-50	670100	30	8057	120	389,30
-40	336500	40	5327	130	300,93
-30	177000	50	3603	140	235,27
-20	97070	60	2488	150	185,97
-10	55330	70	1752		
0	32650	80	1255		



Slika 5.2. R-t karakteristika termistora EC95F103

## 5.1. Sklop za linearizaciju odziva

S promjenom temperature mijenja se i otpor termistora, a tu je promjenu moguće zabilježiti praćenjem naponskog signala koji je pogodan za prikupljanje podataka. Jedna jednostavna izvedba sklopa kojim se omogućuje praktično linearan odziv u odgovarajućem temperaturnom području uključuje stabilizirani izvor napona te serijski spoj termistora sa stabilnim metal-slojnim otpornikom, slika 5.3.



Slika 5.3. Sklop za linearizaciju odziva termistora [26]

Ovisnost otpora termistora  $R_T$  u ovisnosti o temperaturi  $T$  dan je s:

$$R_T = R_0 \cdot e^{B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (5.1)$$

gdje je  $R_0=10 \text{ k}\Omega$  otpor termistora pri  $t=25^\circ\text{C}$ ,  $T_0=298,15 \text{ K}$  referentna temperatura,  $T$  trenutna temperatura, a  $B$  konstanta poluvodičkog materijala.

Omjer napona  $U_x$  i  $U$  na slici 3. funkcija je otpora  $R_T$ , odnosno temperature:

$$\frac{U_x}{U} = f(\vartheta) = \frac{R}{R_T + R}. \quad (5.2)$$

Funkcija dana s (5.2) ima točku infleksije čiji je položaj određen otporom  $R$ . Pretpostavljeno je da će se mjerene temperature kretati u rasponu od  $20^\circ\text{C}$  do  $80^\circ\text{C}$  pa je točka infleksije gornje funkcije odabrana tako da bude u sredini mjernog područja, tj. pri  $50^\circ\text{C}$ . To znači da je:

$$\begin{aligned} \vartheta_i &= 50^\circ\text{C} \\ T_i &= 323,15 \text{ K} \\ R_{Ti} &= 3603 \Omega \end{aligned}$$

U okolišu te točke odziv je praktički linearan. Teorijski izraz (5.1) nije u potpunosti točan jer s promjenom temperature dolazi i do malih promjena iznosa parametra  $B$ . Za

promatrano mjerno područje vrijednost parametra  $B$  izračunata je metodom najmanjih kvadrata na temelju podataka iz Tablice 5.2. te je utvrđeno:

$$B=3970 \text{ K}$$

$$R \approx 2500 \Omega$$

Linearizacijom funkcije dane izrazom (5.2) u temperaturnom području od  $0^\circ\text{C}$  do  $100^\circ\text{C}$  dobija se za jednadžbu pravca izraz:

$$t_r = 130 \cdot \frac{U_x}{U} - 5. \quad (5.3)$$

Ako se odabere napon  $U=1,3 \text{ V}$ , tada se temperatura  $\mathcal{G}$  lako preračuna očitavanjem iznosa napona  $U_x$  s milivoltmetra:

$$\mathcal{G} [^\circ\text{C}] \approx 0,1 [^\circ\text{C}/\text{mV}] \cdot U_x [\text{mV}] - 5 [^\circ\text{C}]. \quad (5.4)$$

Precizniji izraz može se dobiti iz jednadžbi (5.1) i (5.2):

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \cdot \ln \left( \frac{U - U_x}{U} \cdot \frac{R}{R_0} \right). \quad (5.5)$$

U jednadžbu (5.5) potrebno je uvesti dodatni korekcijski faktor zbog temperaturne ovisnosti parametra  $B$  pa je konačan izraz za temperaturu  $\mathcal{G}$ :

$$\mathcal{G} = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot \ln \left( \frac{U - U_x}{4 \cdot U_x} \right) + a_2 \cdot \left( \ln \left( \frac{U - U_x}{4 \cdot U_x} \right) \right)^2} - 273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (5.6)$$

gdje su konstante  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$  izračunate iz baždarne krivulje termistora metodom najmanjih kvadrata te su određene njihove vrijednosti [26]:

$$a_0 = 3,3527 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$a_1 = 2,5784 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1},$$

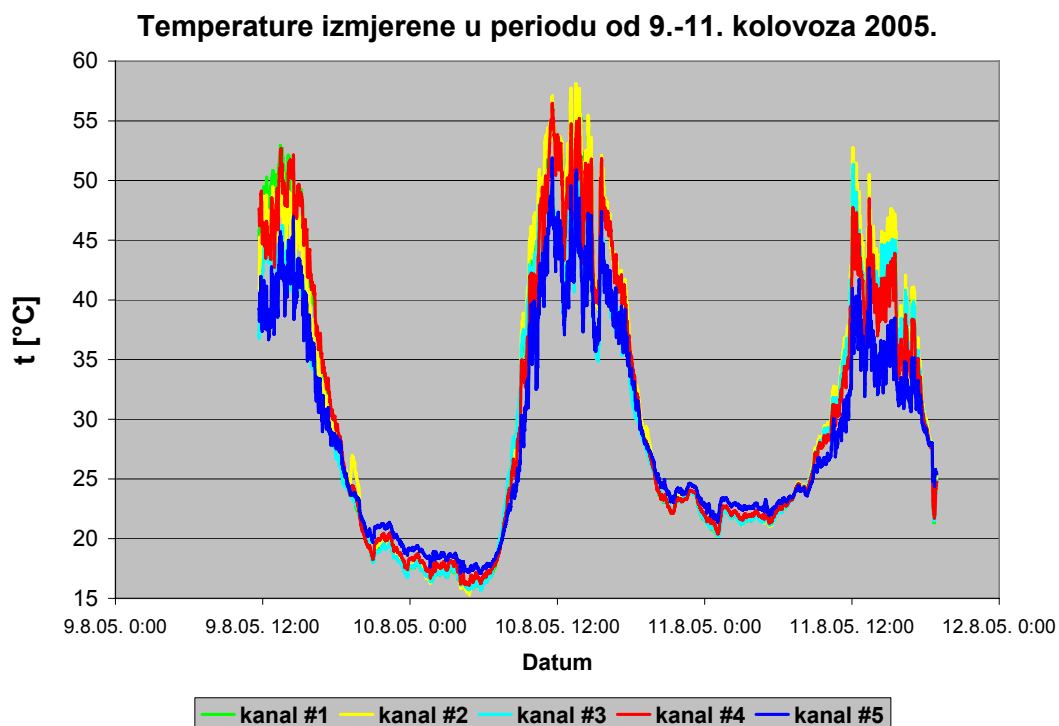
$$a_2 = 2,6796 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Napajanje sklopa realizirano je pomoću zenerove diode ZD 8069 s nazivnim izlaznim naponom od  $U=1,24 \text{ V}$ , što je najbliže željenoj vrijednosti od  $1,3 \text{ V}$ . Uz odabrani predotpor  $R=2,5 \text{ k}\Omega$  napon  $U_x$  se u odabranom temperaturnom području mijenja praktički linearno.

## 5.2. Opis i rezultati mjerenja

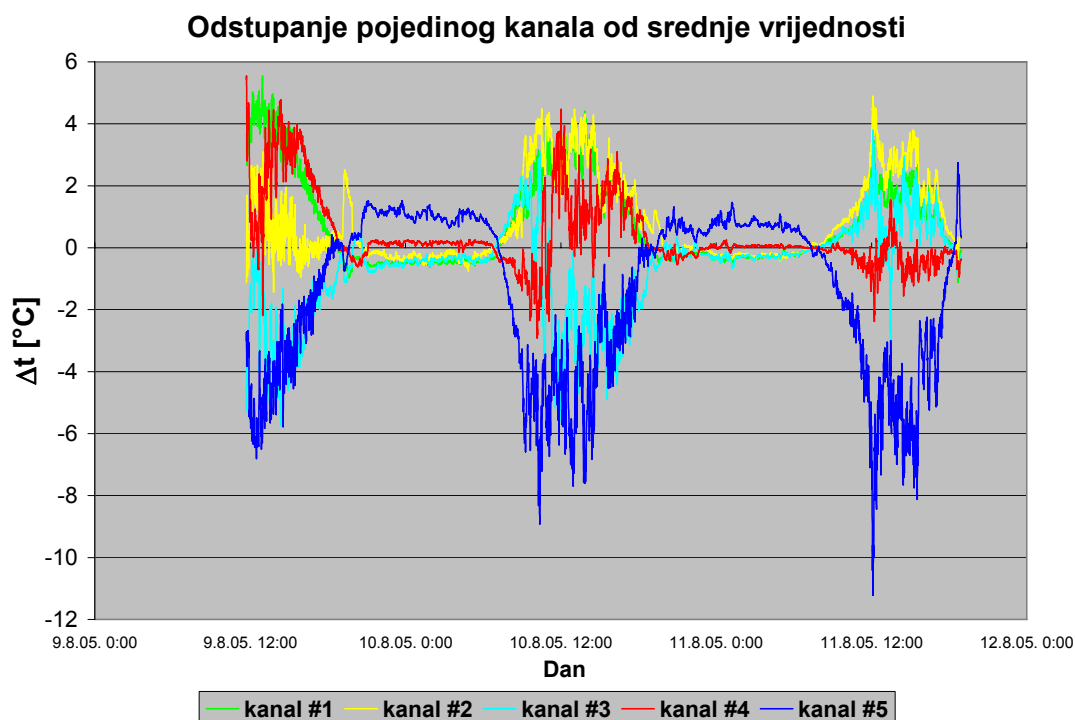
Mjerenje temperature fotonaponskog modula vršeno je tijekom kolovoza i rujna 2005. godine. Upotrijebljeno je 5 termistorskih osjetnika koji su postavljeni na donju površinu fotonaponskog modula i pričvršćeni termovodljivim kitom. Period prikupljanja podataka je 1 minuta.

Na slici 5.4. prikazani su rezultati mjerenja temperature fotonaponskog modula na svih 5 mjernih kanala u razdoblju od 9. do 11. kolovoza 2005. godine. Odstupanje pojedinog mjerenja od srednje vrijednosti prikazano je na slici 5.5.



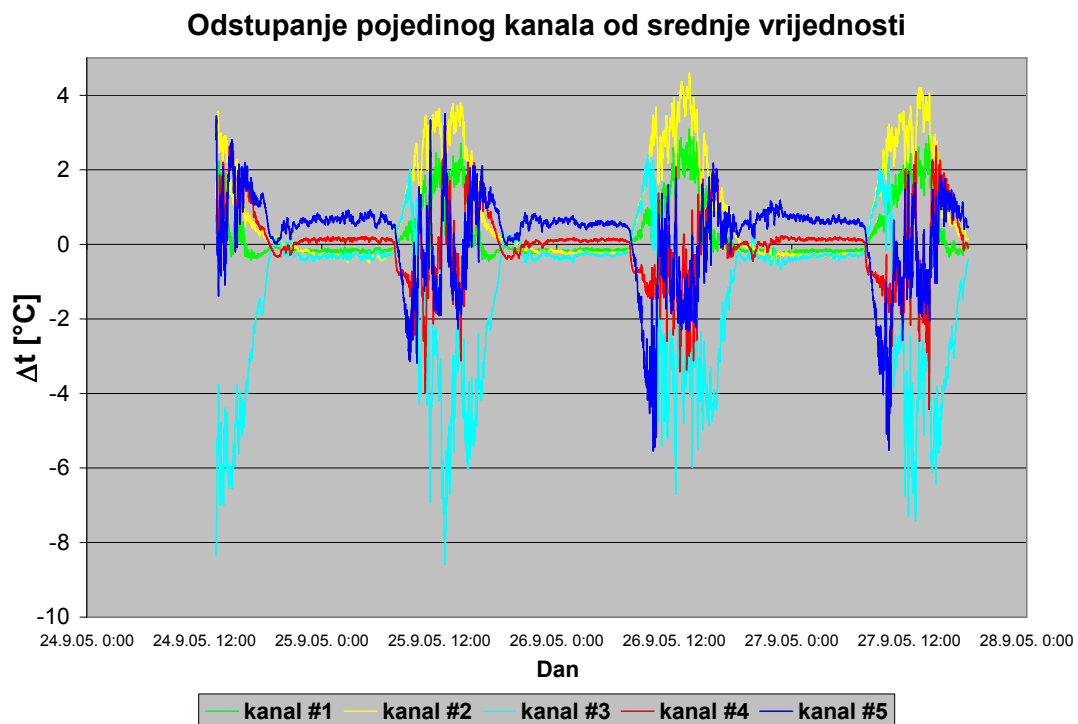
Slika 5.4. Temperature FN modula izmjerene u periodu od 9.-11. kolovoza 2005.





*Slika 5.5. Odstupanje pojedinog kanala od izračunate srednje vrijednosti u periodu od 9.-11. kolovoza*

Uočava se najveće odstupanje temperature izmjerene termistorom 5, a pogotovo je izraženo u trenucima kad je temperatura modula najviša. U tim trenucima mjerni kanal 5 pokazuje i 10°C nižu temperaturu od one izmjerene na kanalima 1 i 2. Uzrok tolikog odstupanja vjerojatno se nalazi u slabom prijanjanju termistora 5 na podlogu fotonaponskog modula. Osjetnik nije u izravnom dodiru s površinom već je okružen termovodljivim kitom kojim je pričvršćen na površinu. Tijekom noći razlika u temperaturama ne može se uočiti no za razdoblje dana kad je Sunčevo zračenje najveće ta razlika postaje znatna. Kanali na kojima je uočeno takvo veće odstupanje izuzeti su pri računanju srednje vrijednosti temperature modula. Za period od 24. do 27. rujna 2005. godine takvo je odstupanje zabilježeno na kanalu 3 što je vidljivo iz slike 5.6.



Slika 5.6. Odstupanje pojedinog kanala od izračunate srednje vrijednosti u periodu od 24.-27. rujna

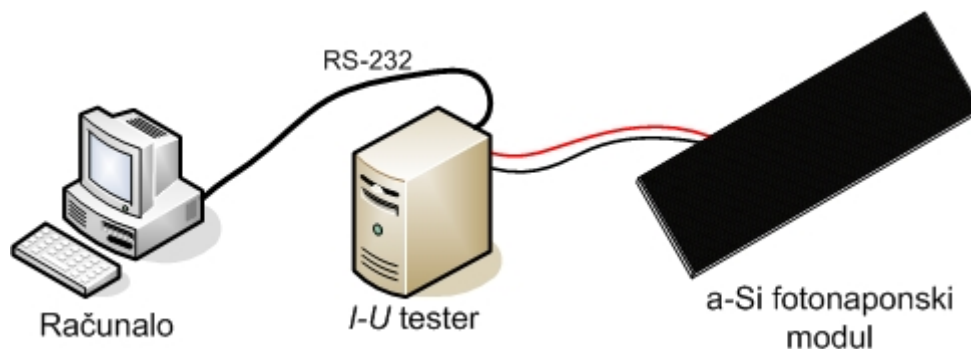
## 6. Mjerenje karakterističnih parametara fotonaponskog modula

Električne karakteristike fotonaponskog modula najbolje su opisane njegovom izlaznom karakteristikom koja se češće kraće naziva  $I-U$  krivulja i na kojoj se mogu izdvojiti tri karakteristične točke koje predstavljaju osnovne parametre fotonaponskog modula: struja kratkog spoja  $I_{ks}$ , napon otvorenog kruga  $U_{ok}$  i točka maksimalne snage  $P_m$ . Često se uz spomenute još daju i podaci o djelotvornosti i o faktoru punjenja, ali se u svakodnevnoj praksi fotonaponski moduli najčešće rangiraju s obzirom na vršnu snagu. Navedene veličine, međutim, nisu stalne; ovise kako o tehnologiji proizvodnje tako i o posebnostima svakog pojedinog modula, ali značajno ovise i o vanjskim utjecajima, odnosno atmosferskim prilikama. Kako bi se omogućila objektivna usporedba proizvedenih fotonaponskih modula definirani su standardni uvjeti testiranja (engl. Standard Testing Conditions, STC) koji podrazumijevaju ozračenje iznosa  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperaturu modula  $25^\circ\text{C}$ , spekter upadnog zračenja koji odgovara raspodjeli AM 1,5 i okomit upad zračenja na modul [27]. Vrijednosti karakterističnih parametara koje proizvođači daju uz svaki pojedini modul dobivene su mjerenjima u upravo tim uvjetima. Definiranjem standardnih uvjeta testiranja omogućeno je uspoređivanje modula proizvedenih u različitim dijelovima svijeta, koji bi inače bili ispitivani u različitim klimatskim prilikama. Međutim, s gledišta korisnika od interesa je poznavati karakteristike fotonaponskog modula u stvarnim, realnim uvjetima rada, a koji se najčešće razlikuju od propisanih standardnih uvjeta testiranja. Na karakteristike modula u realnim uvjetima značajno utječu vanjski faktori, od kojih su najvažniji ozračenje, temperatura, spektralni sadržaj upadnog zračenja te kut pod kojim zračenje upada na modul. Utjecaj svakog pojedinog faktora nije isti za sve module i ovisi i o tehnologiji u kojoj je modul izrađen. Bolja saznanja o ponašanju modula u praktičnim primjenama mogu se dobiti jedino testiranjima u stvarnim uvjetima njegova rada. Jedan od najvećih problema vezanih uz takva testiranja je činjenica da se svi vanjski uvjeti mijenjaju istovremeno, a često su i međusobno povezani zbog čega je vrlo teško sasvim točno izdvojiti zaseban utjecaj svakog pojedinog faktora na radne karakteristike modula.

## 6.1. Opis testiranja

Testiranje je izvršeno na fotonaponskom modulu od amornog silicija, proizvedenog u tvornici Končar – Sunčane ćelije iz Splita. Za spomenutu vrstu modula proizvođač daje sljedeće specifikacije: vršna snaga modula  $W_p=12$  W, napon otvorenog kruga  $U_{ok}=22,5$  V, struja kratkog spoja  $I_{ks}=990$  mA. Dimenzije modula su  $1' \times 3'$  (30,48 cm  $\times$  91,44 cm), što daje površinu od 0,2787 m<sup>2</sup>. Modul je postavljen na krov zgrade FESB-a, usmjeren je točno prema jugu, a nagnut je za 30° u odnosu na horizontalu, što odgovara godišnjem optimalnom kutu. Treba napomenuti da je modul prošao fazu početne degradacije karakterističnu za tehnologiju amornog silicija jer je bio izložen Sunčevom zračenju više od godine dana prije početka testiranja. Uz to, prije početka i tijekom mjerenja modul nije čišćen, odnosno bio je izložen utjecaju prašine i drugim nečistoćama, koje se mogu očekivati i u stvarnim uvjetima rada.

Modul je povezan s uređajem za snimanje strujno-naponske karakteristike, tzv.  $I-U$  testerom kakav se koristi i u tvornici za ispitivanja u standardnim uvjetima. Testerom se upravlja pomoću programa na osobnom računalu s kojim je povezan preko serijskog ulaza RS-232. Program je izrađen tako da korisniku omogućuje neposrednu kontrolu, odnosno odabir programiranog mjerenja. Korisnik može sam upravljati mjerenjem dajući preko tipkovnice instrukcije testeru u trenutku u kojem se želi izvršiti mjerenje. Nakon primanja instrukcije za mjerenje, tester snima 100 parova točaka  $I-U$  karakteristike mijenjajući simulirani teret od kratkog spoja do otvorenog kruga, kao i osnovne parametre modula: napon otvorenog kruga, struju kratkog spoja, točku maksimalne snage te faktor punjenja. Svi se izmjereni podaci zapisuju u datoteku. Mjerenje se može i programirati za što je potrebno unijeti vrijeme početka i završetka mjerenja te period uzorkovanja. Shema mjernog sustava za snimanje strujno-naponske karakteristike fotonaponskog modula prikazana je na slici 6.1.



Slika 6.1. Shema sustava za snimanje  $I-U$  karakteristike modula

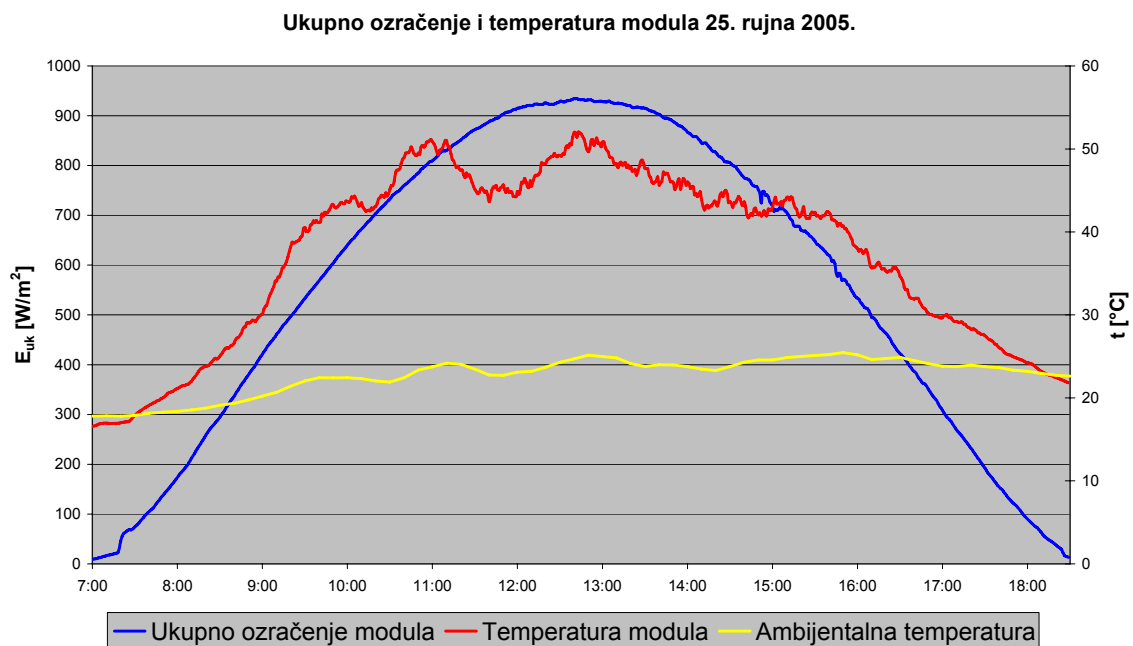
Testiranje fotonaponskog modula vršeno je tijekom kolovoza i rujna 2005. godine, u pravilu snimajući  $I-U$  karakteristike modula svaku minutu od izlaza do zalaza Sunca. Sunčevo zračenje koje upada na površinu modula proračunato je koristeći izmjerene podatke o ukupnom i raspršenom ozračenju horizontalne plohe koristeći Liu-Jordanovu relaciju (3.49), gdje je za vrijednost albeda uzeta u literaturi preporučena vrijednost  $\rho=0,2$  [2]. Istovremeno sa snimanjem  $I-U$  karakteristika i mjerenjima Sunčeva zračenja, vršena su i mjerenja temperature fotonaponskog modula pomoću termistorskih osjetnika koji su termokitom bili pričvršćeni uz stražnju plohu modula. Iz podataka dobivenih spomenutim mjerenjima ispitana je ovisnost osnovnih parametara fotonaponskog modula o najvažnijim ambijentalnim veličinama: ozračenju i temperaturi.

## 6.2. Rezultati mjerenja osnovnih parametara FN modula

Utjecaj pojedinog vanjskog faktora na parametre fotonaponskog modula moguće je preciznije utvrditi jedino testiranjima u laboratorijskim uvjetima na način da se svi ostali faktori održavaju nepromjenjivima, a mijenja se samo veličina čiji se utjecaj želi ispitati. U realnim se uvjetima svi faktori mijenjaju istovremeno, a vrlo su često međusobno povezani pa je zbog toga teško izdvojiti zasebni utjecaj pojedinog faktora na neki od parametara fotonaponskog modula. Spomenuti najčešće razmatrani faktori: ozračenje, temperatura, spektralni sadržaj upadnog zračenja i kut upada Sunčevog zračenja na modul, mijenjaju se periodički tijekom dana, mjeseca i godine. Međutim, veću nepravilnost promjena spomenutih veličina izazivaju promjene u lokalnim atmosferskim prilikama koje se ne mogu precizno predvidjeti. Stoga je učinak fotonaponskog modula u nekoj praktičnoj primjeni vrlo ovisan o lokaciji na kojoj je modul postavljen.

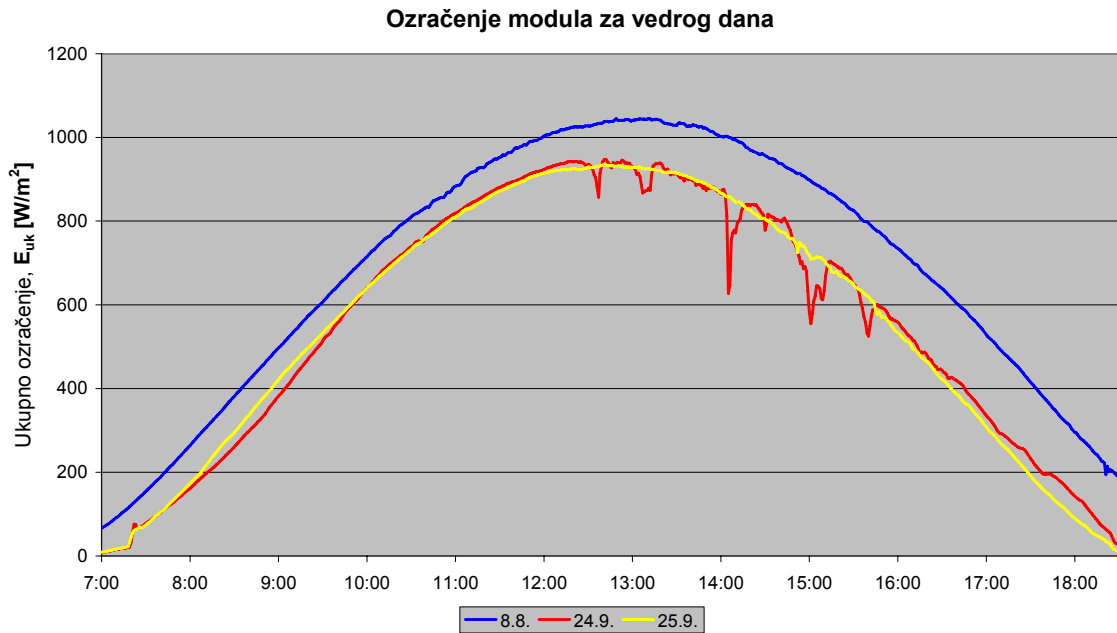
Povezanost ozračenja i temperature modula očituje se na slici 6.2. na kojoj su prikazane vrijednosti ozračenja, temperature modula i temperature zraka izmjerene tijekom tipičnog vedrog dana u kasno ljeto (25. rujna 2005.). Tijekom promatranog dana temperatura zraka vrlo je ujednačena te je razlika između najviše i najniže vrijednosti manja od  $10^{\circ}\text{C}$ . Ozračenje modula raste tijekom jutra, postiže svoj maksimum oko 13 sati te nakon toga počinje opadati. Zbog izostanka oblaka u promatranom danu ozračenje se mijenja kontinuirano, bez naglih promjena. Za razliku od ambijentalne temperature koja ne bilježi velike promjene, temperatura modula mijenja se u skladu s promjenom ozračenja i

od svoje najmanje vrijednosti tijekom dana poraste za oko 35°C. Tako je u 7:30 sati zabilježena temperatura modula od oko 18°C da bi već do 11 sati ona narasla do 51°C. Međutim, za razliku od ozračenosti koja nastavlja rasti i svoju dnevnu maksimalnu vrijednost dostiže oko 13 sati, temperatura modula u periodu od 11 do 13 sati opada na 43,5°C te zatim opet poraste do 51°C. Nakon toga temperatura modula nastavlja pratiti promjenu ozračenja, odnosno zajedno s njom polako opada. Ali nasuprot kontinuiranim promjenama ozračenja, temperatura modula tijekom čitavog dana doživljava kolebanja, a najveća su zabilježena upravo u spomenutom periodu između 11 i 13 sati, kad je vrijednost ozračenja bila najveća. Pri tome treba uzeti u obzir da osim ozračenja na temperaturu modula utječe i čitav niz drugih parametara, kao što su brzina i smjer vjetra, vlažnost zraka i sl. Međutim, iz slike 6.2. može se jasno zaključiti da između ozračenja i temperature modula postoji snažna povezanost.



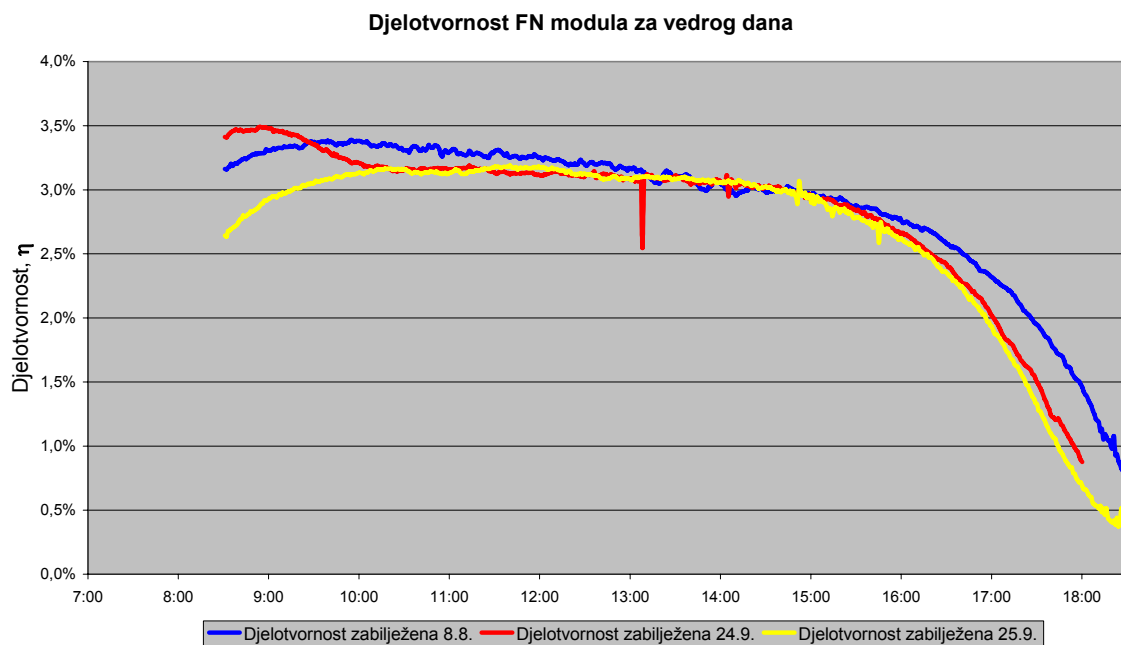
Slika 6.2. Ukupno ozračenje i temperatura FN modula izmjereni 25. rujna 2005. (vedar dan)

Djelotvornost fotonaponskog modula definirana je kao omjer iznosa maksimalne snage  $P_m$  i upadne snage Sunčeva zračenja (2.10). Upadna snaga Sunčeva zračenja je umnožak ozračenja i površine modula, dok je točka maksimalne snage mjerena. Za odabrana tri vedra dana čije su karakteristike ozračenja dane na slici 6.3. izračunata je djelotvornost testiranog fotonaponskog modula, a rezultati su prikazani na slici 6.4.



*Slika 6.3. Ozračenje modula za tri vedra dana*

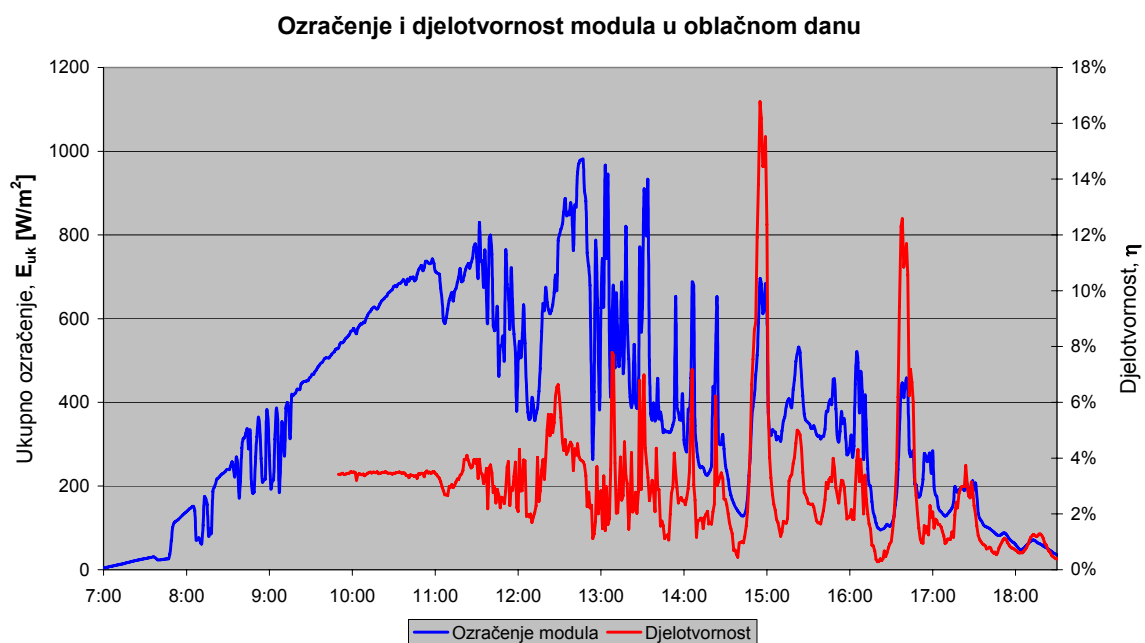
Iz slike 6.3. vidljive su razlike u ozračenju modula početkom kolovoza i krajem rujna. Osim toga, uočava se da je 24. rujna bilo nešto oblaka koji su u nekoliko navrata tijekom popodnevnih sati izazvali diskontinuitet u promjeni ozračenja.



*Slika 6.4. Djelotvornost FN modula tijekom tri promatrana dana*

U sva tri slučaja zabilježena se djelotvornost većinu dana vrlo malo mijenja i uglavnom zadržava vrijednost između 3 i 3,5 %. Značajnije smanjenje djelotvornosti događa se nakon

16 sati kad se osim smanjenja ozračenosti, mijenja i spektralna slika upadnog zračenja. Utjecaj spomenutih efekata na djelotvornost može se bolje uočiti tijekom dana s većom naoblakom, odnosno izraženijim promjenama ozračenja modula, slika 6.5.

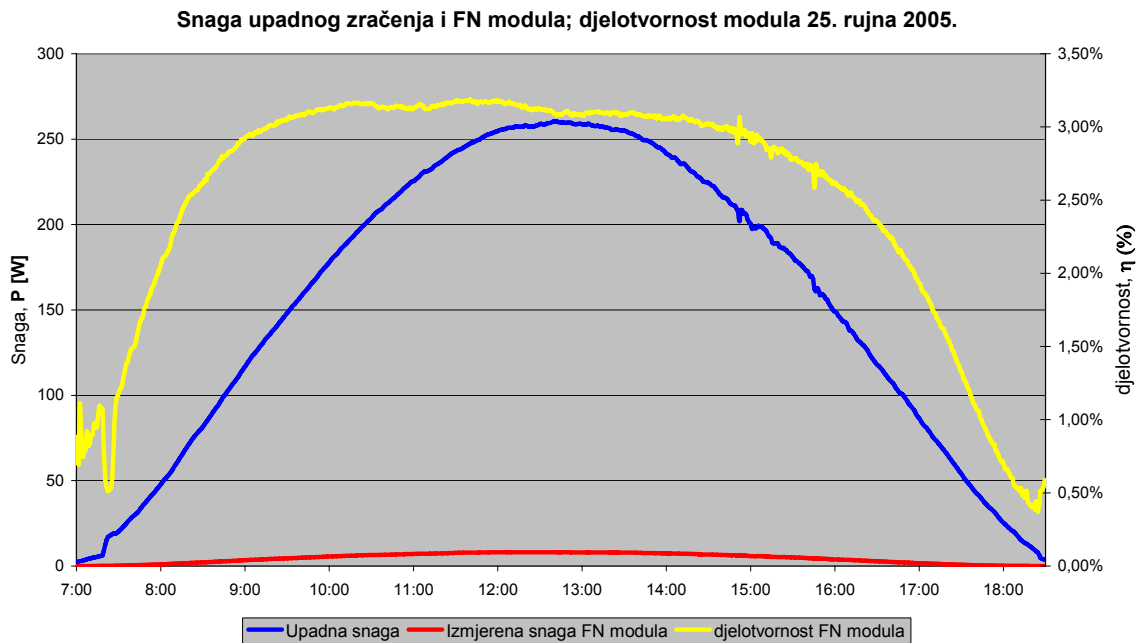


*Slika 6.5. Ozračenje modula i djelotvornost tijekom djelomično oblačnog dana (17. rujan 2005.)*

U periodu u kojem ozračenost raste kontinuirano, djelotvornost je konstantna i iznosi oko 3,5 %. Međutim, s pojavom oblaka dolazi do naglih promjena u ozračenju, što rezultira i u velikim promjenama djelotvornosti, a iz međusobnog odnosa krivulja može se zaključiti da se djelotvornost smanjuje s porastom raspršenog zračenja. Zbog naglih promjena ozračenja u nekoliko je navrata proračunata nerealno velika vrijednost djelotvornosti modula, a iz obavljenih mjerenja može se zaključiti da ona iznosi između 3 i 3,5 %. Razlika između upadne Sunčeve i proizvedene električne energije vidljiva je uspoređujući krivulje snaga snimljenih tijekom vedrog dana (25. rujan 2005.), slika 6.6. Pri tome treba napomenuti da je kao snaga modula uzeta izmjerena vrijednost maksimalne snage. Krivulja maksimalne snage fotonaponskog modula po ponašanju je slična krivulji snage upadnog Sunčeva zračenja, ali je puno položenija. Za razliku od Sunčeva zračenja, koje zadržava maksimalne vrijednosti manje od sat vremena, točka maksimalne snage ostaje gotovo nepromijenjena skoro puna dva sata u razdoblju od 11:40 do 13:40. Omjer upadne Sunčeve i maksimalne električne energije koju može dati testirani fotonaponski



modul od amornog silicija jednak je omjeru površina ispod odgovarajućih krivulja snage. Na slici je paralelno prikazana i djelotvornost, vidljivo je da tijekom većine dana ona zadržava vrijednost malo iznad 3 %.



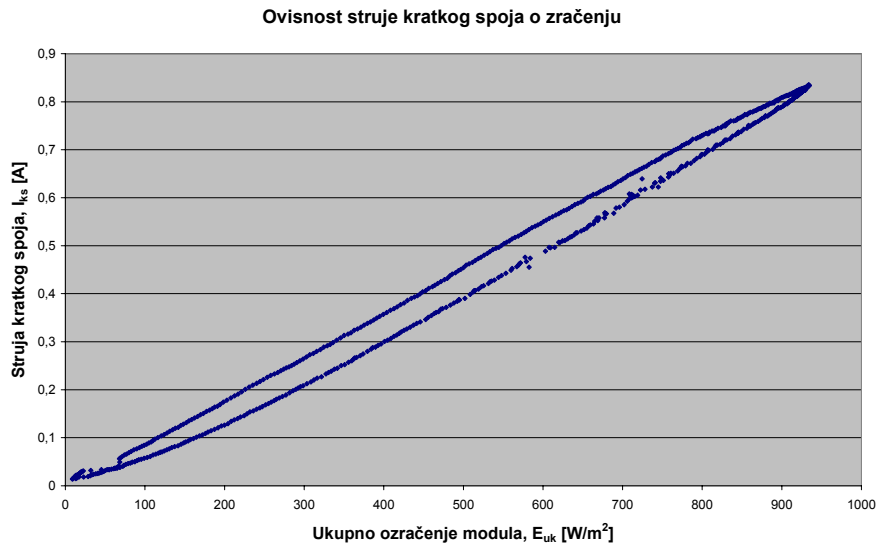
*Slika 6.6. Usporedba snage upadnog Sunčeva zračenja na površinu modula i maksimalne snage modula*

### 6.2.1. Ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju i temperaturi

Promjenom temperature i ozračenja dolazi i do promjene karakteristika fotonaponskog modula. Njihov utjecaj na struju kratkog spoja prikazan je na slikama 6.7. i 6.8. na kojima su prikazani podaci izmjereni tijekom odabranog vedrog dana (25. rujna 2005.).

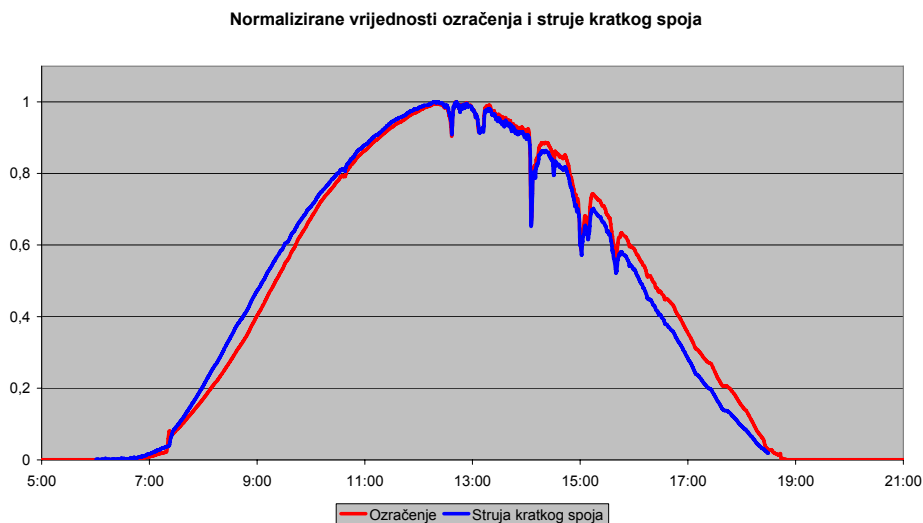
Zabilježena ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju u skladu je s fizikalnim objašnjenjem koje kaže da je struja kratkog spoja zapravo fotostruja, odnosno struja nastala apsorpcijom energije upadnog Sunčeva zračenja zbog čega dolazi do generiranja parova nosilaca elektron-šupljina. Jasno je da je ta struja to veća što je i snaga upadnog Sunčeva zračenja veća, a ta je proporcionalna ovisnost izmjerena i prikazana na slici 6.7. Dvije krivulje koje se opažaju na slici odgovaraju prijepodnevnim (gornja krivulja) i poslijepodnevnim vrijednostima ozračenja (donja krivulja), a odstupanje između tih

vrijednosti ponajprije je posljedica promjene spektralne slike upadnog zračenja tijekom dana. Vidi se da je krivulja ovisnosti gotovo idealan pravac, pogotovo za prijedodnevne vrijednosti, unatoč činjenici da se uz ozračenje istovremeno mijenja i temperatura. Na temelju spomenutog može se zaključiti da temperatura puno manje utječe na iznos struje kratkog spoja od ozračenja.



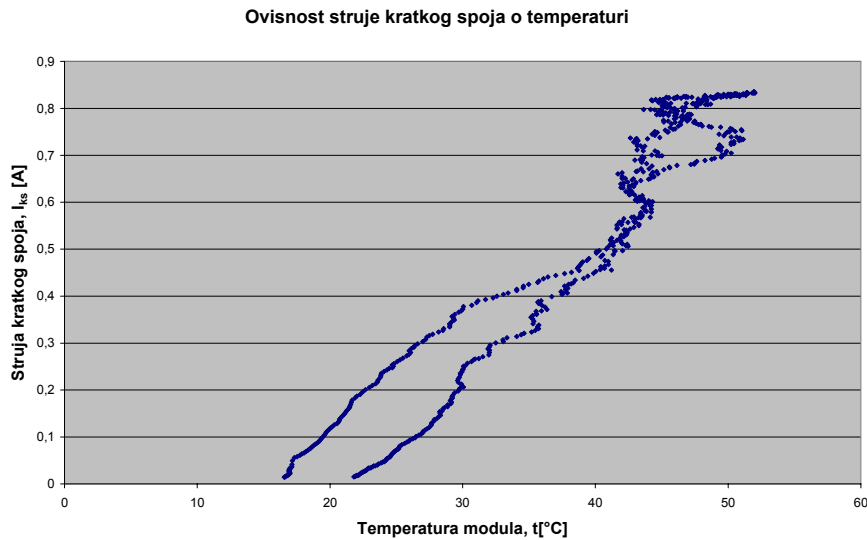
*Slika 6.7. Ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju (izmjereno 25. rujna 2005.)*

Ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju modula još je jasnija ako se na istom grafikonu prikažu normalizirane vrijednosti struje kratkog spoja i ozračenja, slika 6.8.



*Slika 6.8. Normalizirane vrijednosti struje kratkog spoja i ozračenja (izmjerene 24. rujna 2005.)*

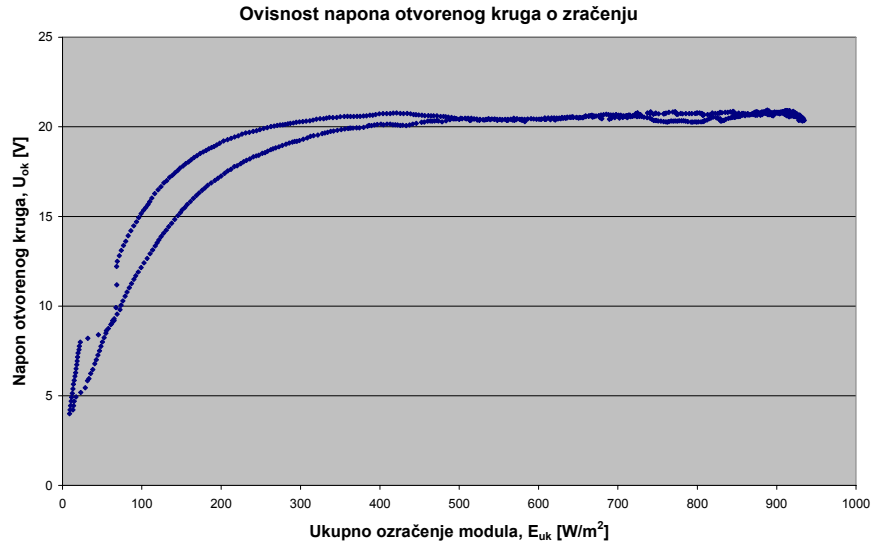
Za razliku od ovisnosti o ozračenju, izmjerena ovisnost struje kratkog spoja o temperaturi modula nešto je složenija i nepravilnija, slika 6.8. Kao i u prethodnom slučaju, zabilježene su različite krivulje prijedodne i poslijepodne. Već je rečeno da ozračenje puno više utječe na struju kratkog spoja od temperature pa iz priložene slike nije moguće odrediti pravi utjecaj temperature. To bi bilo moguće ako bi se mjerila struja kratkog spoja u ovisnosti o promjeni temperature pri nekom konstantnom ozračenju.



6.8. Ovisnost struje kratkog spoja o temperaturi (izmjereno 25.rujna 2005.)

### 6.2.2. Ovisnost napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi

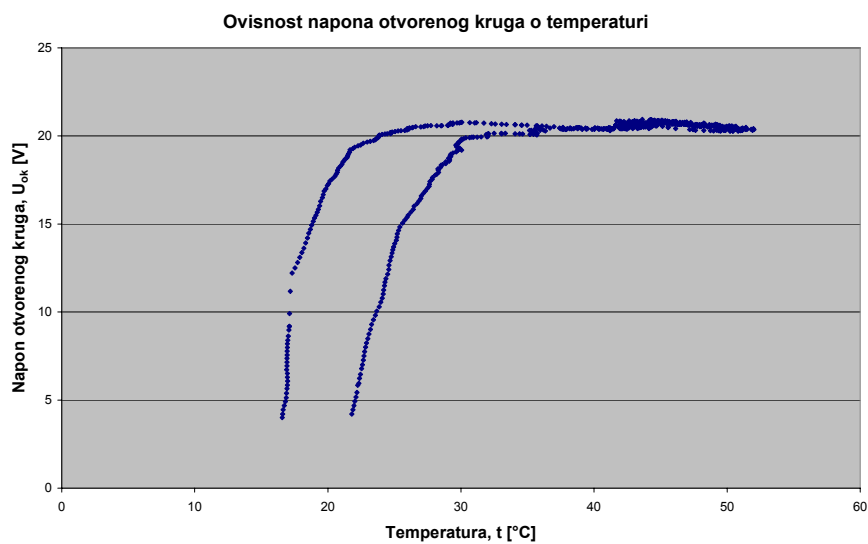
Promjena napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi prikazana je na slikama 6.9. i 6.10. Postojanje različitih krivulja prije i poslijepodne dodatno naglašava potrebu mjerenja spektra upadnog Sunčeva zračenja.



Slika 6.9. Ovisnost napona otvorenog kruga o ozračenju (izmjereno 25. rujna 2005.)

Napon otvorenog kruga mijenja se s ozračenjem po logaritamskoj funkciji; raste do vrijednosti ozračenja od oko 300  $W/m^2$ , a za sve vrijednosti iznad te zadržava gotovo nepromijenjenu vrijednost.

Promjena napona otvorenog kruga pri promjeni temperature modula prikazana je na slici 6.10.



Slika 6.10. Ovisnost napona otvorenog kruga o temperaturi modula (izmjereno 25. rujna 2005.)

### 6.2.3. Proračun funkcijske ovisnosti struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi

Rezultati prikazani u 6.2.1. i 6.2.2. rezultati su testiranja u realnim uvjetima, gdje nije moguće jedan parametar držati nepromjenjivim kako bi se utvrdio precizan utjecaj drugog. Pri tome treba naglasiti da osim ozračenja i temperature značajan utjecaj na karakteristike fotonaponskog modula ima i spektar upadnog Sunčeva zračenja, što se jasno uočava u postojanju dvije krivulje za svako mjerenje ovisnosti prikazano slikama 6.7.-6.10. No, zbog nedostatka opreme spektar upadnog zračenja nije mogao biti mjeren pa je u model za proračun struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga uključena samo ovisnost o ozračenju i temperaturi. Unatoč spomenutom ograničenju u mjerenjima, na temelju izmjerenih vrijednosti struje kratkog spoja, napona otvorenog kruga, ozračenja i temperature moguće je potražiti funkciju koja sa zadovoljavajućom preciznošću opisuje promjenu struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga u ovisnosti o ozračenju i temperaturi modula. Odabrane su funkcije sljedećeg oblika:

$$I_{ks} = a_1 \cdot E_{uk} + b_1 \cdot t, \quad (6.1)$$

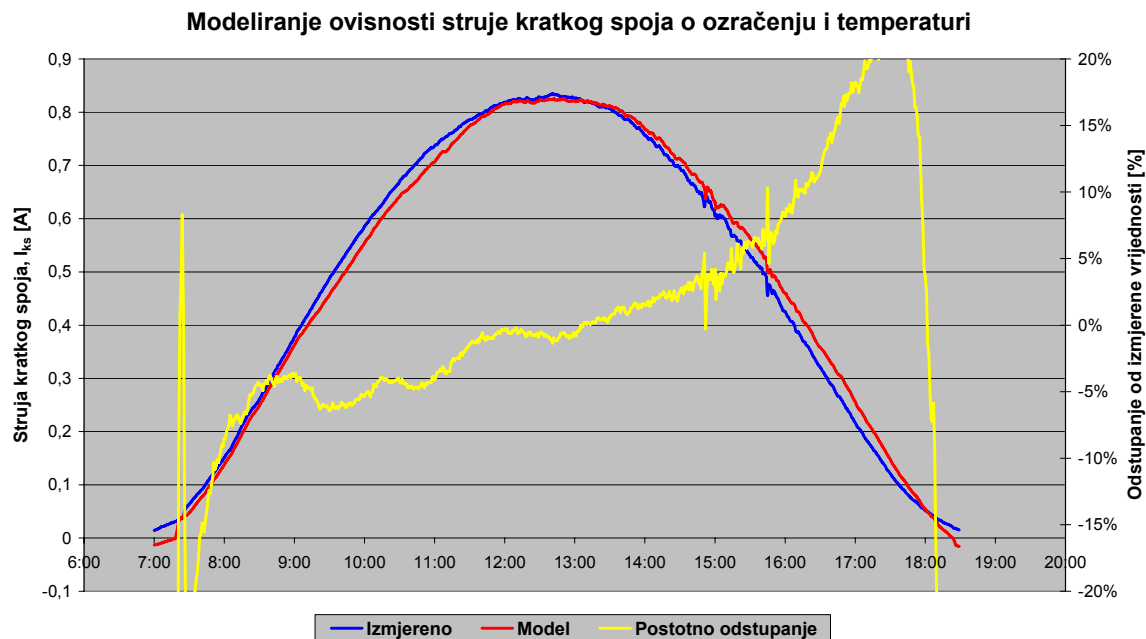
$$U_{ok} = a_2 \cdot \ln(E_{uk}) + b_2 \cdot t + c_2, \quad (6.2)$$

gdje su koeficijenti  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  i  $c_2$  proračunati linearnom regresijom za cjelodnevne podatke izmjerene na promatrani vedar dan. Kako struja kratkog spoja i napon otvorenog kruga ovise i o spektru upadnog zračenja, predloženim se funkcijama njegov utjecaj pokušava pokriti utjecajem ozračenja i temperature. Konačno, uvrštavajući izračunate koeficijente u jednadžbe (6.1) i (6.2), dobivene su sljedeće funkcije:

$$I_{ks} = 0,00095553 \cdot E_{uk} - 0,0013127 \cdot t \text{ [A]}, \quad (6.3)$$

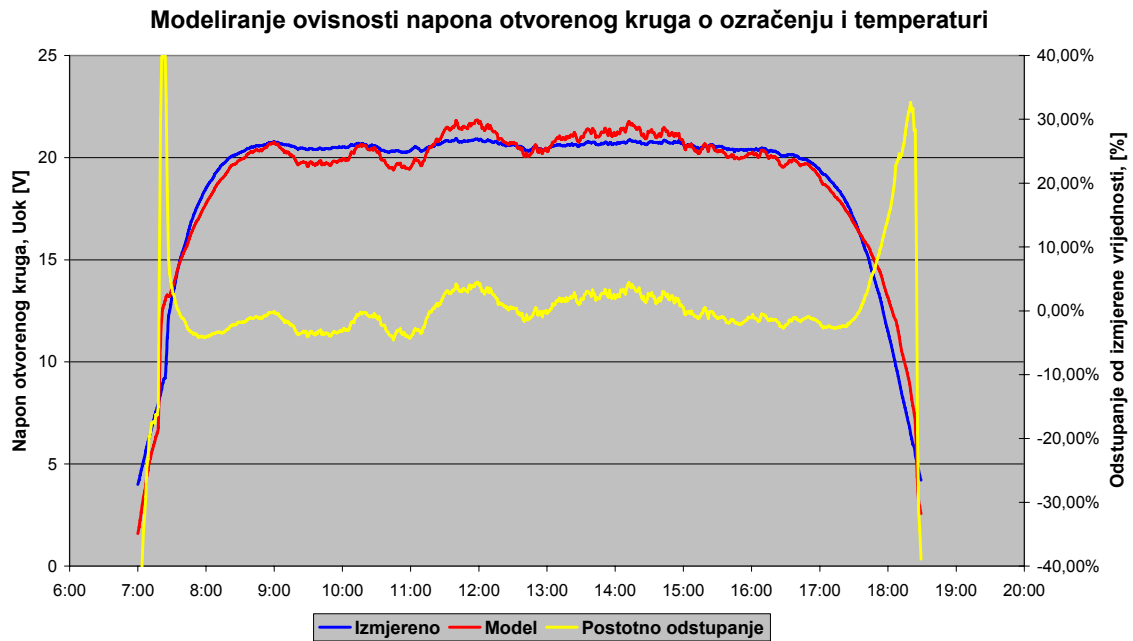
$$U_{ok} = -0,24316 \cdot E_{uk} + 5,843991 \cdot t - 7,24848 \text{ [V]}, \quad (6.4)$$

Izračunate funkcije prikazane su i uspoređene s izmjerenim vrijednostima na slikama 6.11. i 6.12. Isto tako, utvrđeno je da se dodavanjem koeficijenta  $c_1$  u jednadžbu (6.1) ne bi bitno popravila preciznost modela. Iz priloženih rezultata može se zaključiti da iako jednostavnog oblika, predloženi modeli prilično dobro opisuju promjenu struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga tijekom dana.



*Slika 6.11. Usporedba proračunate i izmjerene ovisnosti struje kratkog spoja o ozračenju i temperaturi*

Sa slike 6.11. vidi se vrlo dobro slaganje dobivenog modela s izmjerenim vrijednostima struje kratkog spoja. Odstupanja od izmjerene vrijednosti najmanja su sredinom dana, kad je struja kratkog spoja najveća. Prijepodne model daje vrijednosti manje, a u poslijepodnevima veće od izmjerenih pa se zbog toga postotno odstupanje mijenja od prijepodnevni negativni prema poslijepodnevni pozitivni vrijednostima. Osim toga, tijekom prijepodneva apsolutna vrijednost odstupanja manja je od 10% i zadržava se u tim okvirima već za vrijednosti struje kratkog spoja od oko 150 mA. S druge strane, poslijepodne su zabilježena značajnija odstupanja koja već oko 16 h premašuju 10%, a oko 17 h i 20%. Međutim, takvi rezultati su i očekivani s obzirom na jednostavnost odabrane funkcijske ovisnosti te nemogućnost računanja ovisnosti struje kratkog spoja o spektru upadnog zračenja.



*Slika 6.12. Usporedba proračunate i izmjerene ovisnosti napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi*

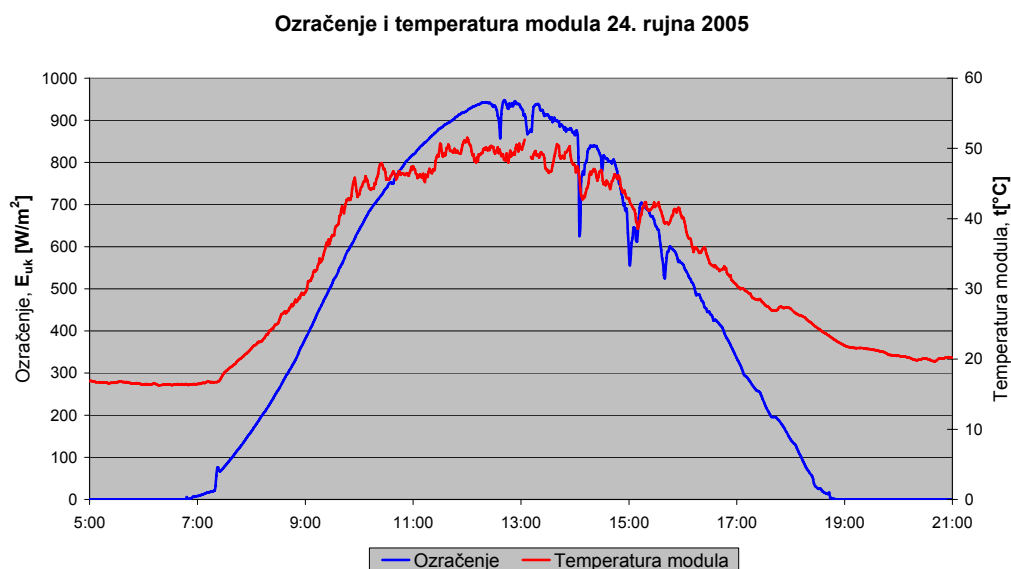
Napon otvorenog kruga nakon izlaska Sunca raste do vrijednosti koju s vrlo malim varijacijama zadržava cijeli dan da bi se pred zalazak Sunca njegova vrijednost opet smanjivala. Odabrana funkcija za modeliranje ovisnosti napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi vrlo dobro se podudara s izmjerenim vrijednostima jer se odstupanje zadržava unutar granica od  $\pm 10\%$  s izuzetkom relativno kratkih perioda tijekom jutra i u predvečer. Tada se napon otvorenog kruga najviše mijenja, a njegova je vrijednost manja zbog čega postotno odstupanje poprima veće vrijednosti.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti da je odabrana funkcija za modeliranje napona otvorenog kruga bolja i točnije opisuje stvarno ponašanje od modela za struju kratkog spoja. Postotno odstupanje od izmjerenih vrijednosti struje kratkog spoja nešto je veće, pogotovo u poslijepodnevni satima. Razlog tome leži u većem utjecaju promjene spektra Sunčeva zračenja, koji je u kasno ljetno poslijepodne (odabrane se vrijednosti odnose na dan 25. rujna 2005.) izraženiji u crvenom području, gdje je osjetljivost sunčane ćelije od amornog silicija manja.

## 6.2.4. Snimanje $I-U$ karakteristika fotonaponskog modula

Električne karakteristike fotonaponskog modula najbolje se mogu razumjeti pomoću njegovih izlaznih, strujno-naponskih ( $I-U$ ) karakteristika. Stoga većina testiranja podrazumijeva snimanje  $I-U$  karakteristika, bilo da se radi o testiranjima u standardnim ili u stvarnim uvjetima. Testiranja na FESB-u vršena su tijekom kolovoza i rujna 2005. i za većinu su dana u tom razdoblju izlazne karakteristike fotonaponskog modula od amornog silicija snimane svaku minutu.

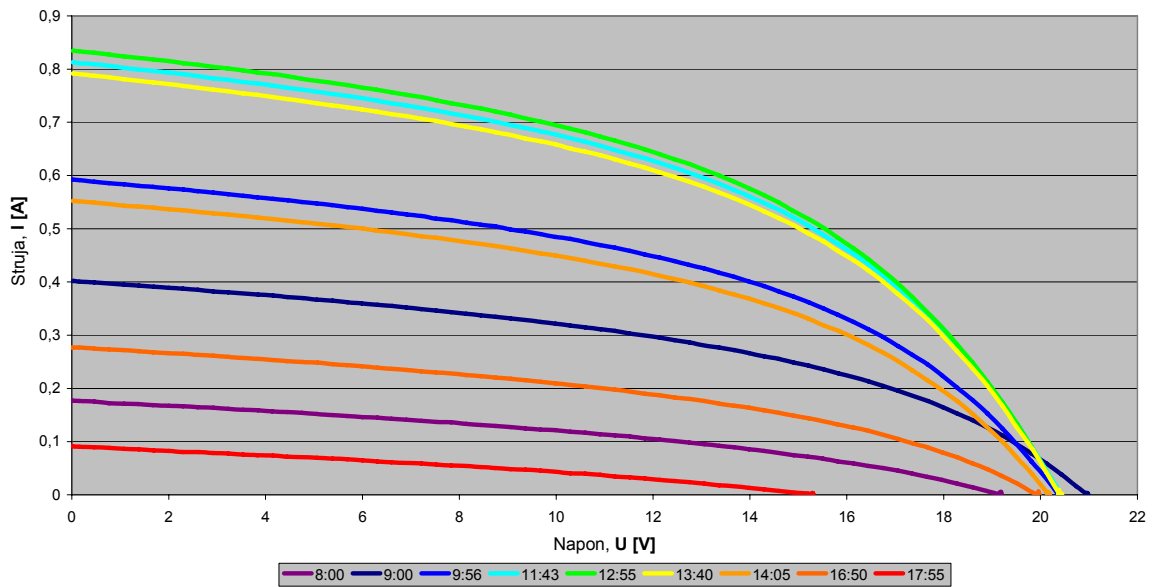
$I-U$  karakteristike fotonaponskog modula mijenjaju se tijekom dana u prvom redu kao posljedica promjene ozračenja modula, a koje opet ovisi o lokalnim atmosferskim prilikama te dobu dana i godine. Tijekom dana mijenja se relativan položaj Sunca u odnosu na površinu modula što znači da izravno Sunčevo zračenje, koje je tijekom vedrih dana najizraženije, upada na modul pod različitim kutom. Uz to, tijekom dana mijenja se i put Sunčevih zraka kroz atmosferu zbog čega se mijenja spektralna slika upadnog zračenja i sve to utječe na električne karakteristike modula. Na slici 6.13. prikazani su ozračenje i temperatura modula izmjereni tijekom vedrog dana 24. rujna 2005., a promjena  $I-U$  karakteristike tijekom tog dana prikazana je na slici 6.14. za nekoliko odabranih trenutaka.



Slika 6.13. Ozračenje i temperatura modula izmjereni 24. rujna 2005.

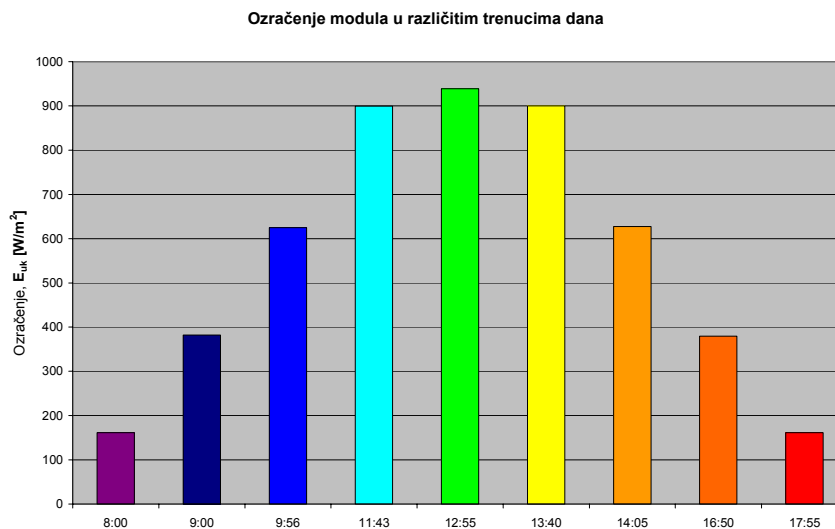


*I-U* karakteristike izmjerene 24. rujna 2005.



Slika 6.14. *I-U* karakteristike fotonaponskog modula u različitim trenucima dana, snimljene 24. rujna 2005.

Ozračenje modula u izmjereno u odabranim trenucima dano je slikom 6.15. Trenuci su odabrani na način da su pronađeni jutarnji i poslijepodnevni trenutak u kojem je ozračenje približno jednako. Na taj je način moguće usporediti *I-U* krivulje za iste vrijednosti ozračenja u različitim trenucima dana. Tako ozračenje ima približno jednake vrijednosti u 8:00 i 17:55, 9:00 i u 16:50, u 9:56 i 14:05 te u 11:43 i 13:40, dok je kao središnji trenutak odabran onaj za koji je tijekom dana izmjerena najveća vrijednost ozračenja.



Slika 6.15. Ozračenje modula u trenucima u kojima su prikazane *I-U* karakteristike

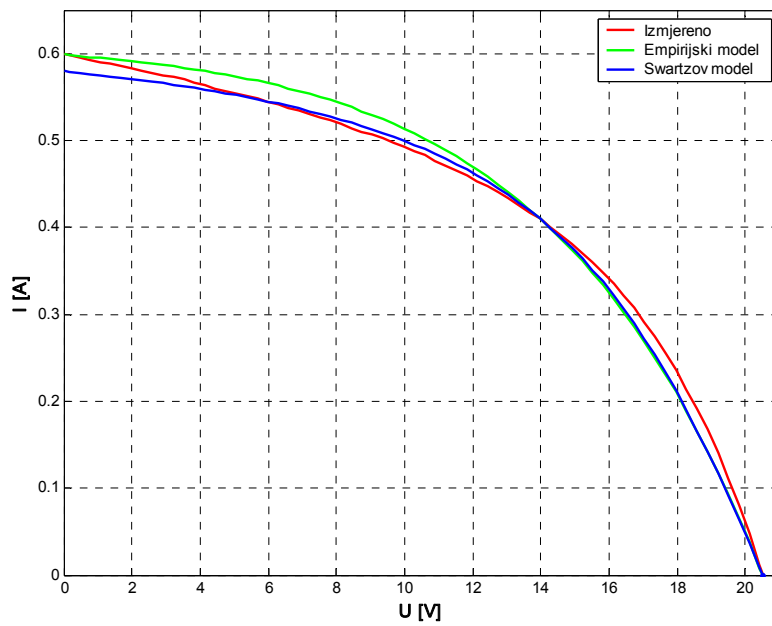
Kao što se vidi iz slike 6.14., za iste vrijednosti ozračenja prijedodne su zabilježene puno bolje  $I-U$  karakteristike nego poslijepodne. Razlika je najveća u iznosu struje kratkog spoja; vrijednosti napona otvorenog kruga sredinom dana ne razlikuju se puno, ali razlika raste sa smanjivanjem iznosa ozračenja. I pri najvećim iznosima ozračenja,  $I-U$  krivulja ima slabo izraženo koljeno, odnosno prilično mali iznos faktora punjenja, koji je tijekom promatranog dana imao najveću vrijednost oko 48%. Kako se iznos ozračenja smanjuje, koljeno pomalo iščezava, odnosno karakteristika se po obliku približava pravcu.

Uočene razlike u snimljenim karakteristikama za iste vrijednosti ozračenja površine modula posljedica su promjene spektra upadnog Sunčeva zračenja. U trenucima oko sunčanog podneva Sunčeve zrake prolaze najkraći put kroz atmosferu pa je tada Rayleighovo selektivno raspršenje najmanje i zračenje je bogatije u plavom dijelu spektra u kojem je kvantna efikasnost sunčanih ćelija od amorfnog silicija najveća. Nasuprot tome, netom nakon izlaska i prije zalaska Sunca dužina puta Sunčevih zraka kroz atmosferu je najveća zbog čega je raspršenje manjih valnih dužina izraženije te je tada veći udio zračenja u crvenom i infracrvenom području na koje je amorfni silicij vrlo slabo osjetljiv zbog malog apsorpcijskog koeficijenta.

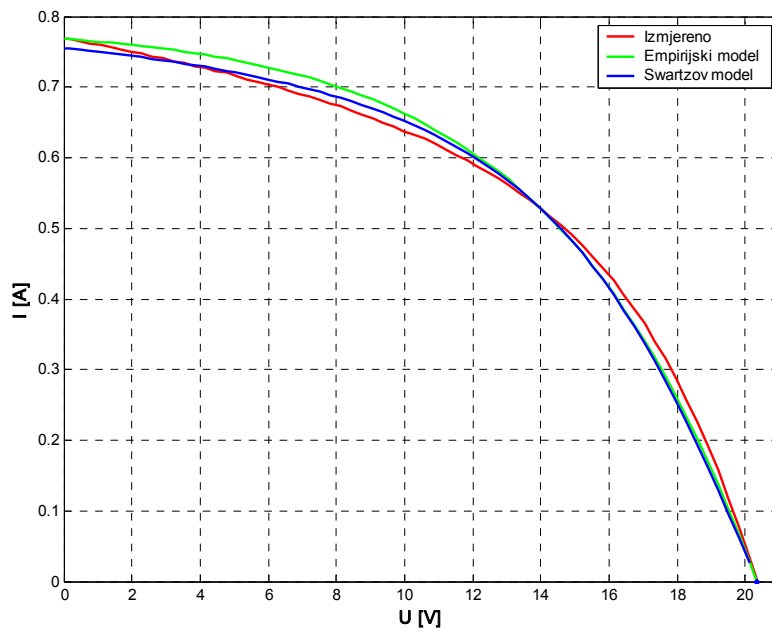
#### **6.2.5. Usporedba Swartzova i empirijskog modela s izmjerenim $I-U$ karakteristikama**

$I-U$  karakteristike fotonaponskog modula mogu se simulirati koristeći neki od mnogih razvijenih modela. Iako se mogu razlikovati po složenosti, većina modela temelji se na poznavanju struje kratkog spoja, napona otvorenog kruga, te struje i napona u točki maksimalne snage, koji se mogu izmjeriti. U ovom su radu odabrana dva modela: empirijski model pogodan je zbog svoje jednostavnosti dok je Swartzov model razvijen posebno za sunčane ćelije od amorfnog silicija s p-i-n strukturom. Spomenuti su modeli uspoređeni međusobno i s  $I-U$  karakteristikama izmjerenima 24. rujna 2005. Parametri potrebni za simulaciju pomoću Swartzova modela  $U_s$ ,  $R_c$  i  $m$  nisu se mogli izmjeriti pa su za svaki pojedini trenutak određeni optimizacijom [6].

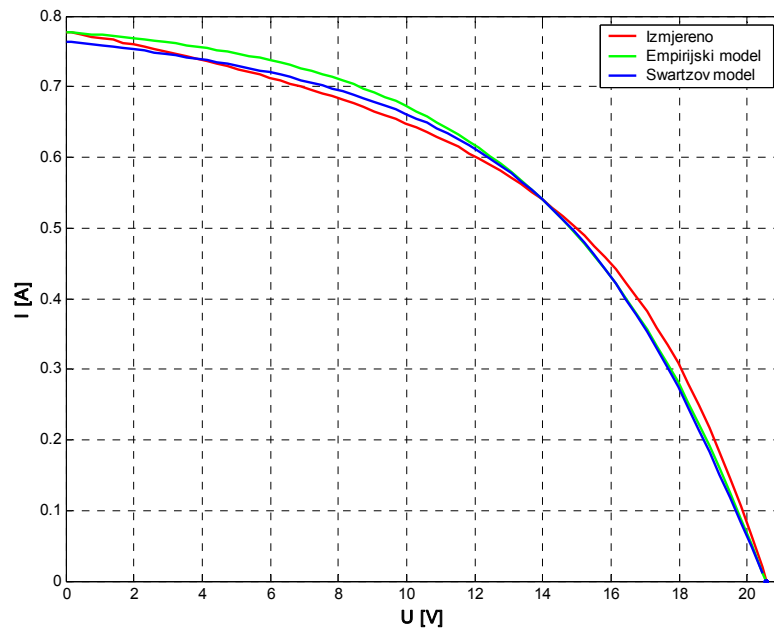
Dobiveni rezultati prikazani su na slikama 6.16.-6.22.



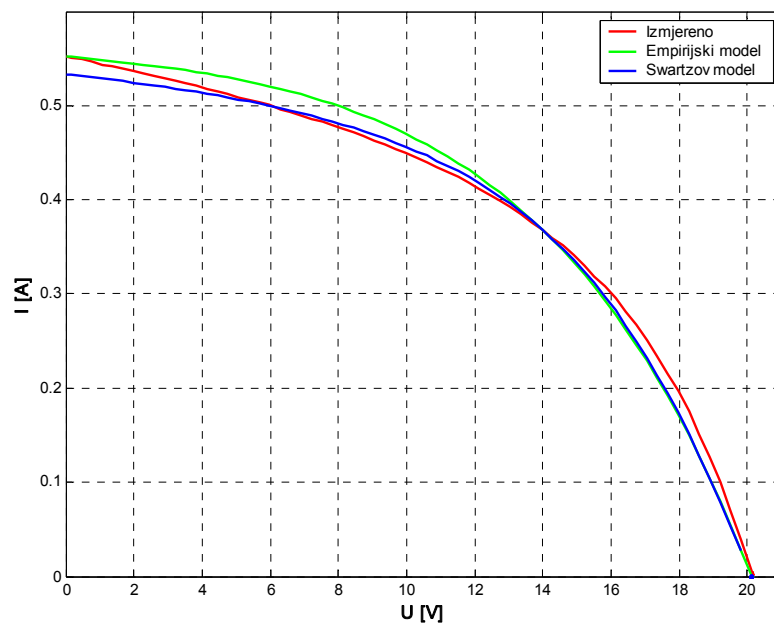
Slika 6.16. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 10:00 sati



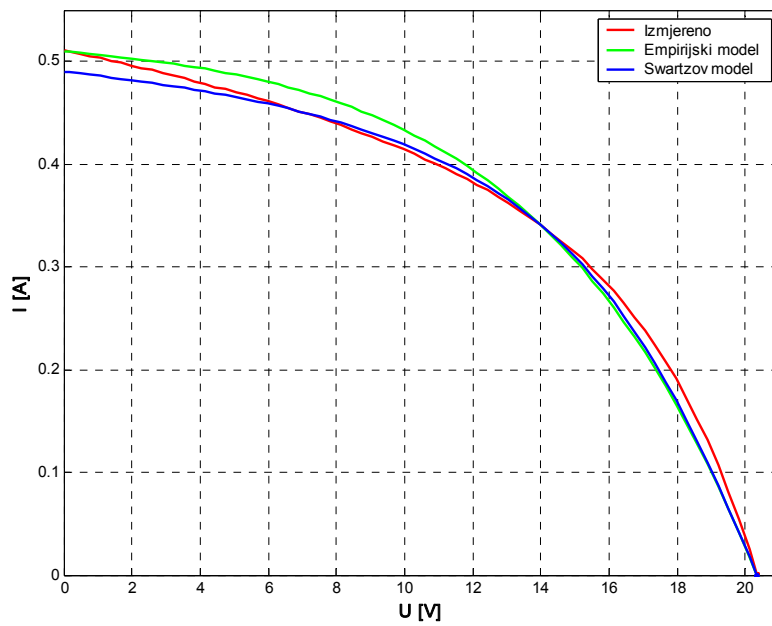
Slika 6.17. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 12:37 sati



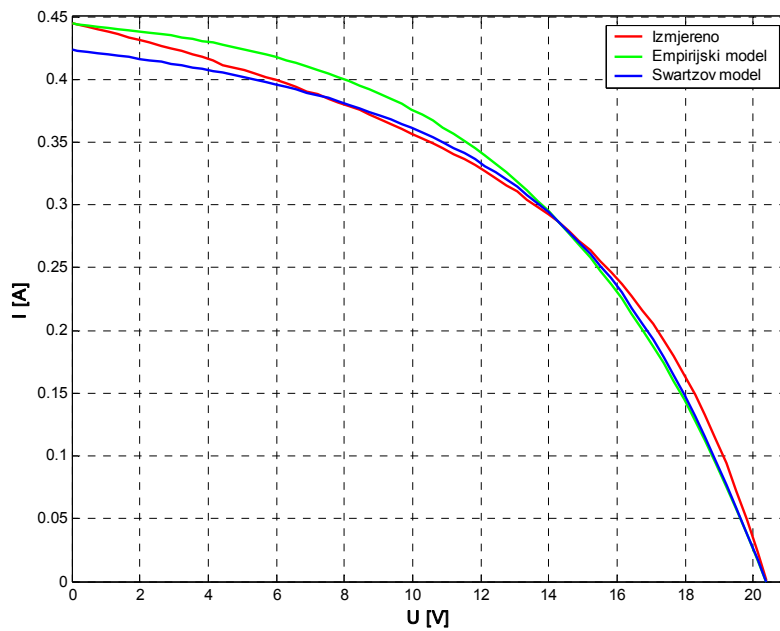
Slika 6.18. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 13:10 sati



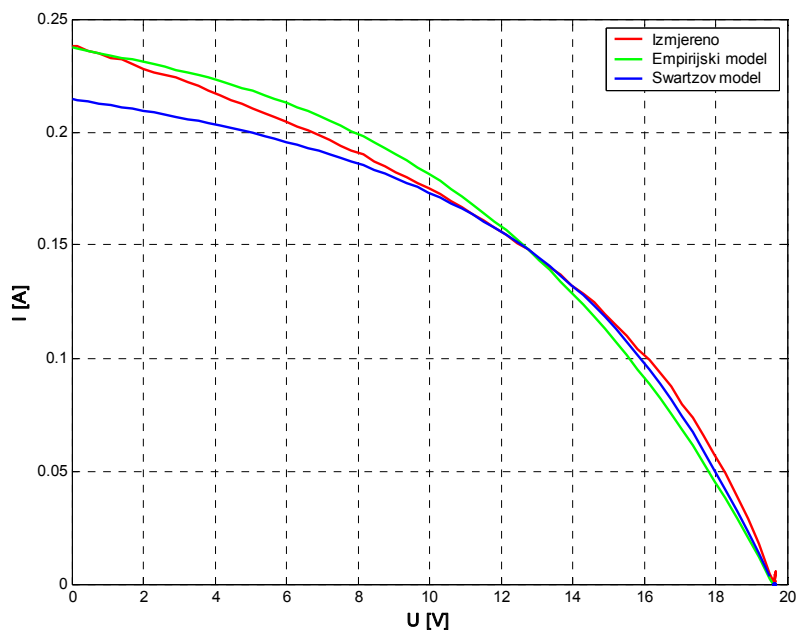
Slika 6.19. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 14:05 sati



Slika 6.20. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 15:00 sati



Slika 6.21. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 15:40 sati



Slika 6.22. Usporedba empirijskog i Swartzovog modela s mjerenjima u 17:00 sati

Kao što je i očekivano, simulirane karakteristike najbolje se slažu s izmjerjenima sredinom dana kad je Sunčevo zračenje najintenzivnije. Za svaki prikazani trenutak proračunato je srednje kvadratno odstupanje oba modela od izmjerene  $I$ - $U$  karakteristike, a rezultati su dani u Tablici 6.1.

Tablica 6.1. Izmjerene vrijednosti osnovnih parametara i suma kvadratnog odstupanja Swartzovog i empirijskog modela od mjerenja

Vrijeme	$E_{uk}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$E_b$ [W/m <sup>2</sup> ]	$E_d$ [W/m <sup>2</sup> ]	$t$ [°C]	$I_{ks}$ [A]	$U_{ok}$ [V]	$P_m$ [W]	$\sum(I_{mj}-I_{model})^2$ [A <sup>2</sup> ]	
								Swartz	empirijski
10:00	640	540	93	43,4	0,60	20,53	5,73	0,00972	0,01982
12:37	857	768	81	49,4	0,77	20,35	7,39	0,01497	0,02381
13:10	873	775	89	48,8	0,78	20,54	7,56	0,01655	0,02486
14:05	627	523	98	45,9	0,55	20,15	5,15	0,00881	0,01820
15:00	583	485	92	42,9	0,51	20,35	4,77	0,00854	0,01628
15:40	525	439	81	39,3	0,44	20,38	4,10	0,00723	0,01415
17:00	336	260	72	30,5	0,24	19,64	1,89	0,00754	0,00311

Sredinom dana, za veće vrijednosti ozračenja modula, Swartzov model bolje se slaže s mjerenjima od empirijskog, dok se empirijski model pokazao boljim u 17:00 sati, kad je ukupno ozračenje modula manje. Oba modela najbolje se slažu s mjerenjima u točki maksimalne snage. Međutim, pogodnost empirijskog modela je njegova jednostavnost za primjenu, dok je za Swartzov model potrebno posebnim mjerenjima odrediti njegove

parametre: faktor idealnosti diode  $m$  određuje se mjerenjem ovisnosti  $U_{ok}=f(\ln I_{ks})$ , a omski otpor  $R_c$  i napon na fotootporu  $U_s$  dobiju se iz ovisnosti  $dU/dI=f(1/I_{ks})$  u uvjetima otvorenog kruga. Za oba mjerenja potrebno je osigurati konstantnu temperaturu, što je u realnim uvjetima rada vrlo teško.

## 7. Zaključak

Podaci o fotonaponskim modulima koje daju proizvođači dobiveni su njihovim testiranjem u standardnim uvjetima i ne omogućuju ispravnu procjenu stvarnih karakteristika modula u realnim uvjetima rada. Naime, standardni uvjeti podrazumijevaju ozračenje modula od  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperaturu modula od  $25^\circ\text{C}$ , spektrar upadnog Sunčeva zračenja koji odgovara raspodjeli AM 1,5 i normalan upad zraka na površinu modula. Stvarni se uvjeti rada općenito razlikuju od standardnih uvjeta testiranja pa su samim tim drugačije i radne karakteristike modula. One ne ovise samo o tehnologiji u kojoj je modul izrađen i zasebnosti svakog proizvedenog uzorka, već su bitno određene i klimatološkim uvjetima koji vladaju na mjestu njegove primjene, u prvom redu o ozračenosti, temperaturi, spektralnim efektima i kutu upada. Testiranja u realnim uvjetima omogućuju precizniju procjenu ponašanja fotonaponskog modula u stvarnim uvjetima rada i pomažu u efikasnijem projektiranju fotonaponskih sustava.

U ovom radu opisano je testiranje fotonaponskog modula od amornog silicija postavljenog na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Modul je usmjeren izravno prema jugu, a u odnosu na horizontalu nagnut je pod godišnjim kutom od  $30^\circ$ . Testiranje je obuhvatilo tri zasebna mjerenja vršena istovremeno: mjerenje Sunčeva zračenja, mjerenje temperature modula i snimanje strujno-naponskih karakteristika fotonaponskog modula.

U projektiranju sustava temeljenih na korištenju Sunčeve energije često je potrebno poznavati iznos svake pojedine komponente Sunčeva zračenja. Uređaji za mjerenje izravne i raspršene komponente Sunčeva zračenja moraju pratiti gibanje Sunca po nebu što ih čini prilično skupima i zahtjevnima za održavanje. Grupa autora (Faiman i dr.) predložila je mjerni sustav kojim se eliminiraju postojeći nedostaci, a koji se zasniva na korištenju četiri različito usmjerena piranometra. Poznavajući geometriju sustava i karakteristike prividnog Sunčeva gibanja po nebu, iz očitavanja piranometara moguće je metodom najmanjih kvadrata proračunati iznos izravne i raspršene komponente Sunčeva zračenja. Pri tome je potrebno eliminirati utjecaj reflektirane komponente postavljanjem zatamnjenih maski koje predstavljaju umjetni horizont za svaki od instrumenata. Osim toga, za dobivanje vrijednosti izravne i raspršene komponente potrebno je koristiti neki od postojećih modela Sunčeva zračenja. Na temelju mjerenja vršenih na području Izraela, autori metode utvrdili



su da se na ovaj način mogu odrediti vrijednosti izravne i raspršene komponente Sunčeva zračenja s preciznošću usporedivom s mjerenjima uobičajenom instrumentacijom (pirheliometar za mjerenje izravne, odnosno zasjenjeni piranometar za mjerenje raspršene komponente).

Sustav za mjerenje Sunčeva zračenja postavljen je na zgradi Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu i pušten je u rad u svibnju 2005. Sastoji se od dva multipiranometarska niza, piranometara za mjerenje ukupnog i raspršenog zračenja te meteoroloških osjetnika za mjerenje temperature, tlaka i vlažnosti zraka, te brzine i smjera vjetra. Svi instrumenti spojeni su na sustav za prikupljanje podataka koji bilježi vrijednosti mjerenja svakih 10 s te uz to vrši usrednjavanje za period od 10 min. Predočeni su i analizirani podaci mjerenja Sunčeva zračenja za period od svibnja do rujna 2005. godine. U spomenutom razdoblju najveći mjesečni prosjek ukupnog ozračenja horizontalne plohe izmjeren je tijekom lipnja i srpnja, s maksimalnim dnevnim vrijednostima oko  $900 \text{ W/m}^2$ , dok je u rujnu mjesečni prosjek ozračenja manji otprilike 30%. Za razliku od ukupnog ozračenja, koje se jasno razlikuje od mjeseca do mjeseca, promjene u mjesečnom prosjeku raspršenog ozračenja puno su manje. Izmjerene vrijednosti ukupnog ozračenja horizontalne plohe uspoređeni su s petogodišnjim prosjekom izmjerenom u Institutu za oceanografiju i ribarstvo u Splitu; vrijednosti izmjerene na FESB-u manje su od petogodišnjeg prosjeka, ali su odstupanja za svaki mjesec manja od 10%.

Metodom multipiranometarskog niza određeno je ukupno ozračenje horizontalne plohe u svibnju, lipnju i srpnju. Pri tome je korišten najjednostavniji, izotropni model, koji pretpostavlja da je raspršeno zračenje podjednako iz svih smjerova neba. Ta je pretpostavka približno zadovoljena samo tijekom vedrih dana, dok za oblačne i pogotovo djelomično oblačne dane ne daje dovoljno dobre rezultate. Iz satnih prosjeka očitavanja svakog od četiri piranometra u multipiranometarskom nizu, metodom najmanjih kvadrata proračunate su satne vrijednosti ukupnog ozračenja za svaki dan u mjesecu, iz čega je dobiven mjesečni prosjek satnog ukupnog ozračenja horizontalne plohe. Za sva tri mjeseca izračunato je srednje kvadratno odstupanje od izmjerene vrijednosti te su dobivene vrijednosti  $28,47 \text{ W/m}^2$  za svibanj,  $33,52 \text{ W/m}^2$  za lipanj i  $35,49 \text{ W/m}^2$  za srpanj, a postotno odstupanje od izmjerenih vrijednosti tijekom gotovo čitavog dana ne prelazi vrijednost od  $\pm 10\%$ . Najveća odstupanja od izmjerenih vrijednosti uočena su sredinom dana i tijekom poslijepodneva i u tom su periodu vrijednosti ukupnog ozračenja proračunatog metodom multipiranometarskog niza redovito manji od izmjerenih. Metoda

bi se mogla poboljšati primjenom nekog od anizotropnih modela druge generacije (Perez, Muneer i drugi) koji puno bolje opisuju stvarne karakteristike raspršenog Sunčeva zračenja. Osim toga, s obzirom na relativno nepovoljan položaj mjernog mjesta koje je okruženo zgradama potrebno je dodatno ispitati kvalitetu izrađenih maski za zasjenjivanje i utjecaj reflektiranog zračenja.

Sustav za mjerenje temperature sastoji se od pet termistorskih osjetnika koji su bili pričvršćeni na donju površinu modula i postavljeni u kutove i u središte modula. Temperatura modula proračunata je kao srednja vrijednost temperatura izmjerenih sa svih pet termistora. Uočeno je da temperatura modula u promatranom razdoblju postiže dnevne maksimalne vrijednosti oko  $55^{\circ}\text{C}$ .

Snimanje  $I-U$  karakteristike modula vršeno je pomoću  $I-U$  testera, kakav je korišten u tvornici Sunčane ćelije d.o.o. iz Splita za testiranja u standardnim uvjetima. Testiranje je vršeno u realnim uvjetima u kojima se svi klimatološki parametri mijenjaju istovremeno i često su međusobno povezani pa je u tim uvjetima vrlo teško precizno odrediti točan utjecaj svakog pojedinog parametra na radne karakteristike fotonaponskog modula. Ispitivanja su obuhvatila mjerenje ozračenja i temperature modula uz istovremeno snimanje  $I-U$  karakteristike. Djelotvornost testiranog modula proračunata je iz izmjerene maksimalne snage i ukupnog ozračenja modula i pronađeno je da je tijekom vedrih dana njena vrijednost uglavnom između 3 i 3,5% te da opada u poslijepodnevnim satima. Isto tako, snimajući ovisnost struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga o temperaturi i ozračenju modula, uočene su za svaku ovisnost dvije krivulje, međusobno malo razmaknute. Ta se razlika između vrijednosti izmjenjenih prijepodne i poslijepodne može pripisati utjecaju promjene spektra Sunčeva zračenja tijekom dana. Naime, fotonaponski modul od amorfne silicija slabije je osjetljiv u području većih valnih dužina, gdje je Sunčevo zračenje bogatije u ljetno poslijepodne. Utvrđena je jaka linearna ovisnost struje kratkog spoja o ozračenju, dok je utjecaj temperature puno manji. Napon otvorenog kruga relativno brzo ujutro naraste na svoju maksimalnu vrijednost koju uz male promjene zadržava tijekom većine dana, da bi se krajem dana opet smanjio. Na temelju izmjerenih vrijednosti, metodom najmanjih kvadrata pronađeni su parametri pretpostavljenih jednostavnih funkcija koje opisuju ovisnost struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga: struja kratkog spoja aproksimirana je linearnom ovisnosti o ozračenju i temperaturi, dok je napon otvorenog kruga aproksimiran logaritamskom ovisnosti o ozračenju i linearnom ovisnosti o temperaturi. Pronađene funkcije opisuju promjene struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga sa zadovoljavajućom točnošću, uz znatnija odstupanja za male vrijednosti

ozračenja (ujutro i krajem dana). Ipak, tijekom poslijepodnevni sati odstupanja su značajnija za struju kratkog spoja, što se također može pripisati značajnijem utjecaju promjene spektra. To je dodatno potvrđeno uspoređujući izmjerene  $I-U$  karakteristike jer uz isto ukupno ozračenje modula svim krivuljama snimljenim poslijepodne pripadaju manje vrijednosti struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga nego ujutro.

Konačno, izmjerene  $I-U$  karakteristike fotonaponskog modula uspoređene su sa simuliranima koristeći dva karakteristična modela: empirijski i Swartzov model. Empirijski je model jednostavan i zahtijeva poznavanje osnovnih parametara modula: struju kratkog spoja, napona otvorenog kruga te struju i napon u točki maksimalne snage. Swartzov je model razvijen posebno za p-i-n strukturu sunčane ćelije od amorfnog silicija, no njegov je nedostatak potreba određivanja dodatnih parametara: faktora idealnosti diode  $m$ , omskog otpora  $R_c$  i napona na fotootporu  $U_s$ . Spomenuti se parametri moraju odrediti promjenom ozračenja uz konstantnu temperaturu što u realnim uvjetima nije moguće pa je njihova vrijednost simulirana u okviru granica dobivenih prijašnjim mjerenjima. Usporedbom simuliranih i izmjerenih  $I-U$  karakteristika, opaža se dobro slaganje oba modela sredinom dana, kad su vrijednosti ozračenja veće i spektralni utjecaj slabiji. Usporedbom sume kvadrata odstupanja utvrđeno je da je Swartzov model nešto precizniji, osim u kasnim poslijepodnevnim satima kad je ozračenje modula manje.

## Literatura

- [1] European Commission, *A Vision for Photovoltaic Technology*, Report by the Photovoltaic Technology Advisory Council, 2005.
- [2] P. Kulišić, J. Vuletin, I. Zulim, *Sunčane ćelije*, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [3] C. Honsberg, S. Bowden, *Photovoltaics: Devices, Systems and Applications PVCDROM 1.0*, University of New South Wales, 1999.
- [4] H. S. Rauschenbach, *Solar Cell Array Design Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1980.
- [5] G. A. Swartz, *Closed-Form Solution of I-V Characteristic for a-Si:H Solar Cells*, Semiconductors and Semimetals, Vol. 21, Part D, Chapter 3 str. 39-53, 1984.
- [6] I. Vuknić, *Modeliranje fotonaponskog modula od amorfnog silicija*, magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 1994.
- [7] BP Statistical Review of World Energy June 2005, Excel Workbook
- [8] K. Scharmer, J. Greif, *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 1: Fundamentals and maps*, Les Presses de l'École des Mines 2000.
- [9] Canada Centre for Remote Sensing, *Tutorial: fundamentals of Remote Sensing*
- [10] M. A. Green, *Solar Cells*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1982.
- [11] M. Pidwirny, *The Physical Environment: An Introduction to Physical Geography*, 2005.
- [12] K. Scharmer, J. Greif: *The European Solar Radiation Atlas, Vol. 2: Database and exploitation software*, Les Presses de l'École des Mines 2000.
- [13] University of Oregon, Solar Radiation Monitoring Laboratory, *Pacific Northwest Solar Radiation Data book*, 1999.
- [14] Z. Matić, *Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – priručnik za energetske korištenje Sunčeva zračenja*, 2005.
- [15] P. Tsalides, A. Thanailakis, *Direct Computation of the Array Optimum Tilt Angle in Constant-Tilt Photovoltaic Systems*, Solar Cells 14 (1985) 1, str. 83-89.
- [16] D. Faiman, A. Zemel, *A method for monitoring insolation in remote regions*, Solar Energy 38 (1987) 5, str. 327-333.
- [17] B. Steinmüller, *The two-solarimeter method for insolation on inclined surfaces*, Solar Energy 25 (1980) 5, str. 449-460.

- [18] D. Faiman, D. Feuermann, P. Ibbetson, A. Zemel, *A multipyranometer instrument for obtaining the solar beam and diffuse components, and the irradiance on inclined planes*, Solar Energy 48 (1992) 4, str. 253-259.
- [19] D. Faiman, D. Feuermann, A. Zemel, *Site-independent algorithm for obtaining the direct beam insolation from a multipyranometer instrument*, Solar Energy 50 (1993) 1, str. 53-57.
- [20] D. R. Myers, S. M. Wilcox, W. F. Marion, N. M. Al-Abbadi, M. bin Mahfoodh, Z. Al-Otaibi, *Final Report for Anex II – Assessment of Solar Radiation Resources in Saudi Arabia 1998-2000*, NREL 2002.
- [21] Thies Clima, *Pyranometer CM 11 – Instruction for use*
- [22] Kipp&Zonen, *CM 11 / CM 14 Pyranometer/Albedometer Instruction Manual*
- [23] Kipp&Zonen, *CM 6B / CM 7B Pyranometer/Albedometer Instruction Manual*
- [24] Kipp&Zonen, *SP Lite Silicon Pyranometer Instruction Manual*
- [25] [www.izor.hr](http://www.izor.hr)
- [26] S. Milun, B. Jajac, G. Petrović, D. Sinovčić, *Mjerenje temperaturnog polja u okolišu modela opterećenog vn kabela u kabelskom tunelu HE "Zakučac" – Sustav za mjerenje temperatura i akviziciju podataka*, FESB, 2005.
- [27] Y. Poissant, L. Couture, L. Dignard-Bailey, *Simple Test Methods for Evaluating the Energy Ratings of PV Modules Under Various Environmental Conditions*, CANMET Energy Technology Centre, 2003.

## SAŽETAK

Karakteristike fotonaponskog (FN) modula u realnim uvjetima rada osim o tehnologiji proizvodnje uvelike ovise o različitim klimatskim faktorima na mjestu primjene. Stoga podaci koje o modulima daju proizvođači, a koji su dobiveni testiranjima u standardnim uvjetima (ozračenje  $1000 \text{ W/m}^2$ , temperatura modula  $25^\circ\text{C}$ , masa zraka AM 1,5 i okomit upad Sunčeva zračenja na modul) ne omogućuju precizno predviđanje radnih svojstava i učinkovito projektiranje FN sustava.

U ovom su radu predočeni i analizirani rezultati testiranja FN modula od amorfnog silicija u realnim uvjetima. Testiranje je vršeno tijekom kolovoza i rujna 2005. godine na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu i sastojalo se od istovremenog mjerenja Sunčeva zračenja, temperature modula i snimanja  $I-U$  karakteristika.

Prikazani su petomjesečni rezultati mjerenja Sunčeva zračenja (od svibnja do rujna), kao i ukupno zračenje na horizontalnu površinu određeno pomoću multipiranometarskog niza za tri mjeseca (od svibnja do srpnja). Uočeno je da se primjenom jednostavnog izotropnog modela neba ukupno zračenje na horizontalnu plohu može izračunati sa srednjim kvadratnim odstupanjem iznosa oko  $30 \text{ W/m}^2$ .

Na temelju izmjerenih podataka određene su funkcije ovisnosti struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga o ozračenju i temperaturi koristeći jednostavne linearne modele. Utvrđeno je da ozračenje puno jače utječe i na struju kratkog spoja i na napon otvorenog kruga od temperature. Zabilježeno je značajno smanjenje  $I-U$  krivulje tijekom poslijepodnevni sati što je posljedica intenzivnijeg zračenja u crvenom dijelu spektra u tim dijelovima dana.

Konačno,  $I-U$  krivulje su simulirane primjenom empirijskog i Swartzova modela i uspoređene s izmjerenima. Iako je Swartzov model pokazao bolje slaganje, njegovi se parametri moraju odrediti posebnim mjerenjima u kontroliranim uvjetima što ga čini nepraktičnim za testiranja u realnim uvjetima rada.

**Ključne riječi:** testiranje u realnim uvjetima, Fotonaponski modul, amorfnu silicij,  $I-U$  krivulja, Sunčevo zračenje, multipiranometarski niz, model sunčane ćelije

## ABSTRACT

The performance of the photovoltaic (PV) module in real operating conditions is determined not only by the module technology but also by various climatic factors at the site of application. Hence, PV module data reported by manufacturers and corresponding to Standard Testing Conditions (1000 W/m<sup>2</sup>, module temperature of 25°C, air mass AM1.5 and normal incidence) are not suitable for making accurate performance predictions and efficient PV systems designs.

In this work, the results of outdoor testing of the amorphous silicon PV module are presented and analyzed. The testing has been performed during August and September 2005. at the Faculty of Electrical Engineering in Split and has included simultaneous monitoring of solar radiation, module temperature and module *I-V* characteristics.

The results of five months solar radiation measurements (May to September 2005) are presented together with global horizontal radiation determined with multipyranometer method for three months (May to July 2005). It is found that using simple isotropic sky model global horizontal radiation can be calculated with RMSE of around 30 W/m<sup>2</sup>.

Based on measured data, the dependences of module short-circuit current and open-circuit voltage on irradiance and temperature are found and modeled using simple linear functions. It is found that irradiance affects both short-circuit current and open-circuit voltage much stronger than does temperature. Significant degradation of module *I-V* curve was observed in the afternoon because during the testing period (late summer) solar radiation in the afternoon has a significantly higher portion of radiation with greater wavelengths.

*I-V* curves are simulated using empirical and Swartz model and are compared to the measured data. The Swartz model performed a bit better, but is inconvenient for outdoor testing because measurements in laboratory conditions are required in order to determine its parameters.

**Keywords:** outdoor testing, photovoltaic module, amorphous silicon, *I-V* curve, solar radiation, multipyranometer, solar cell model

## ŽIVOTOPIS

Tihomir Betti rođen je 27. siječnja 1977. godine u Splitu. Nakon završene osnovne škole pohađao je III. Gimnaziju u Splitu gdje je 1995. godine maturirao s odličnim uspjehom. Iste godine upisuje studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. Tijekom studija radio je kao demonstrator na kolegijima Fizika 1, Fizika 2 i Fizika 3. Diplomirao je s vrlo dobrim uspjehom na smjeru elektronike, usmjerenja primijenjena elektronika, u veljači 2001. godine obranivši diplomski rad pod naslovom "Optimalni kut nagiba fotonaponskog panela" pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Ivana Zulima. U lipnju 2001. godine nagrađen je godišnjom nagradom "Hrvoje Požar" za posebno istaknuti diplomski rad iz područja energetike.

Od 8. lipnja 2001. godine zaposlen je na FESB-u kao znanstveni novak na projektima 023052 – Energetski tokovi u pasivnim i aktivnim solarnim sustavima (do 2002.) i 0023004 – Komponente i sustavi za fotonaponsku pretvorbu Sunčeve energije (2002.-) čiji je glavni istraživač prof. dr. sc. Ivan Zulim. U travnju 2001. godine upisao je poslijediplomski studij elektrotehnike na FESB-u. U znanstveno-istraživačkom radu bavi se u prvom redu fotonaponskim sustavima te je u razdoblju od lipnja 2001. do listopada 2005. godine objavio 6 radova na međunarodnim znanstvenim skupovima. Kao asistent sudjeluje u nastavi na kolegijima Elektronika, Elektroničke komponente, Industrijska elektronika i Sunčane ćelije.